

Structure et Composition des atmosphères Planétaires



Atmosphères planétaires

- Planètes telluriques
 - Mercure : atmosphère très ténue (vent solaire)
 - Vénus : atmosphère dense
 - Terre : atmosphère respirable résultant d'une co-évolution biologique
 - Lune : pas d'atmosphère
 - Mars : atmosphère ténue
- Planètes géantes gazeuses :
 - atmosphères très denses en continuité avec l'intérieur (pas de surface physique)
 - satellites : pas d'atmosphère ... sauf Titan !
- Pluton : atmosphère ténue

Mars, Vénus et la Terre

- Atmosphère = Équilibre entre
 - Des réservoirs de volatils en surface (Pour la Terre, principalement les océans, biomasse, surface, subsurface, Pour Mars, les calottes polaires)
 - Des sources de volatils d'origine crustale ou mantellique (volcanisme, activité hydrothermale)
 - Une perte de l'atmosphère dans l'espace
 - Parfois... un gain d'atmosphère de l'espace (marginal, mais présent)
- Paramètres contrôlant l'équilibre
 - Température de surface (réaction chimiques et physiques), état de surface (altération), vie
 - Gravité, vent solaire, protection magnétique, insolation
 - Activité volcanique et hydrothermale

Cartes d'identités : Terre

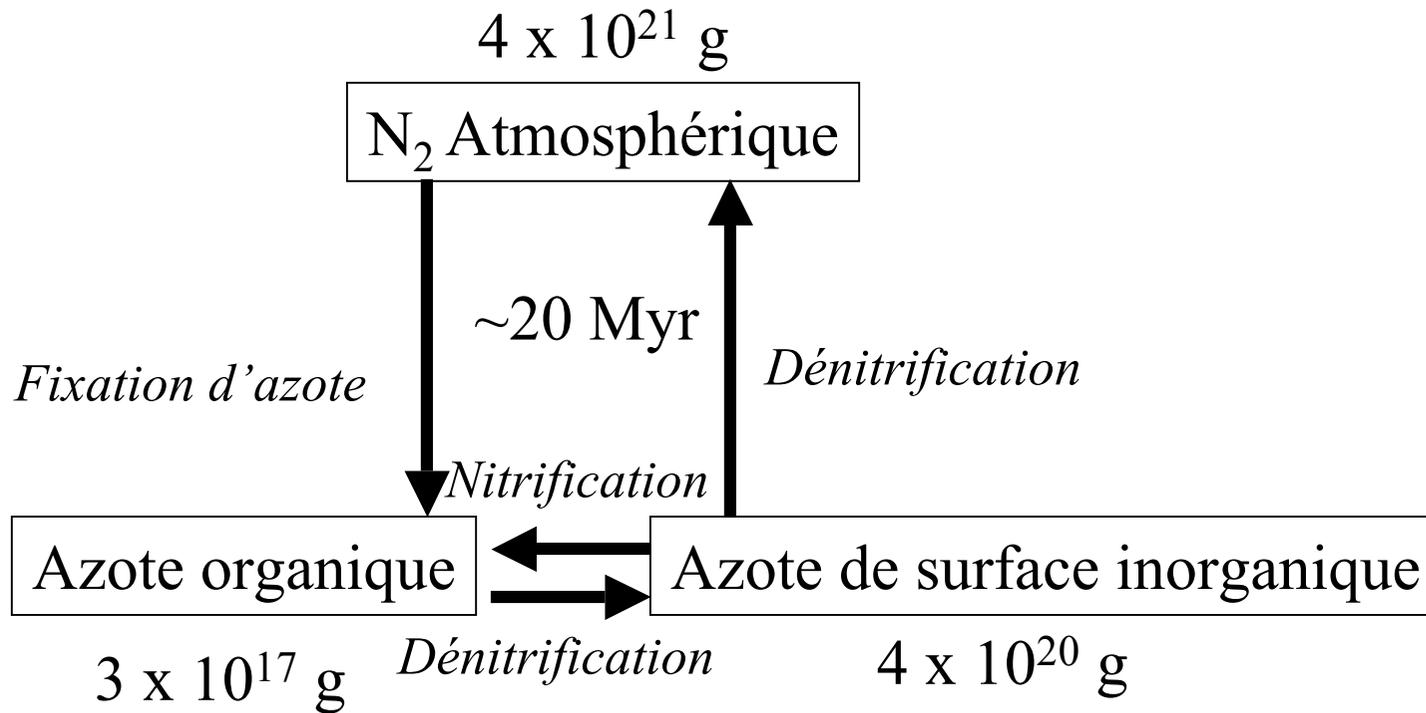
Atmosphère de N₂ et O₂ principalement co-évoluant avec les processus de surface (vie, géologie)

Faibles variations de la pression et de température (maintien de l'eau à l'état liquide)

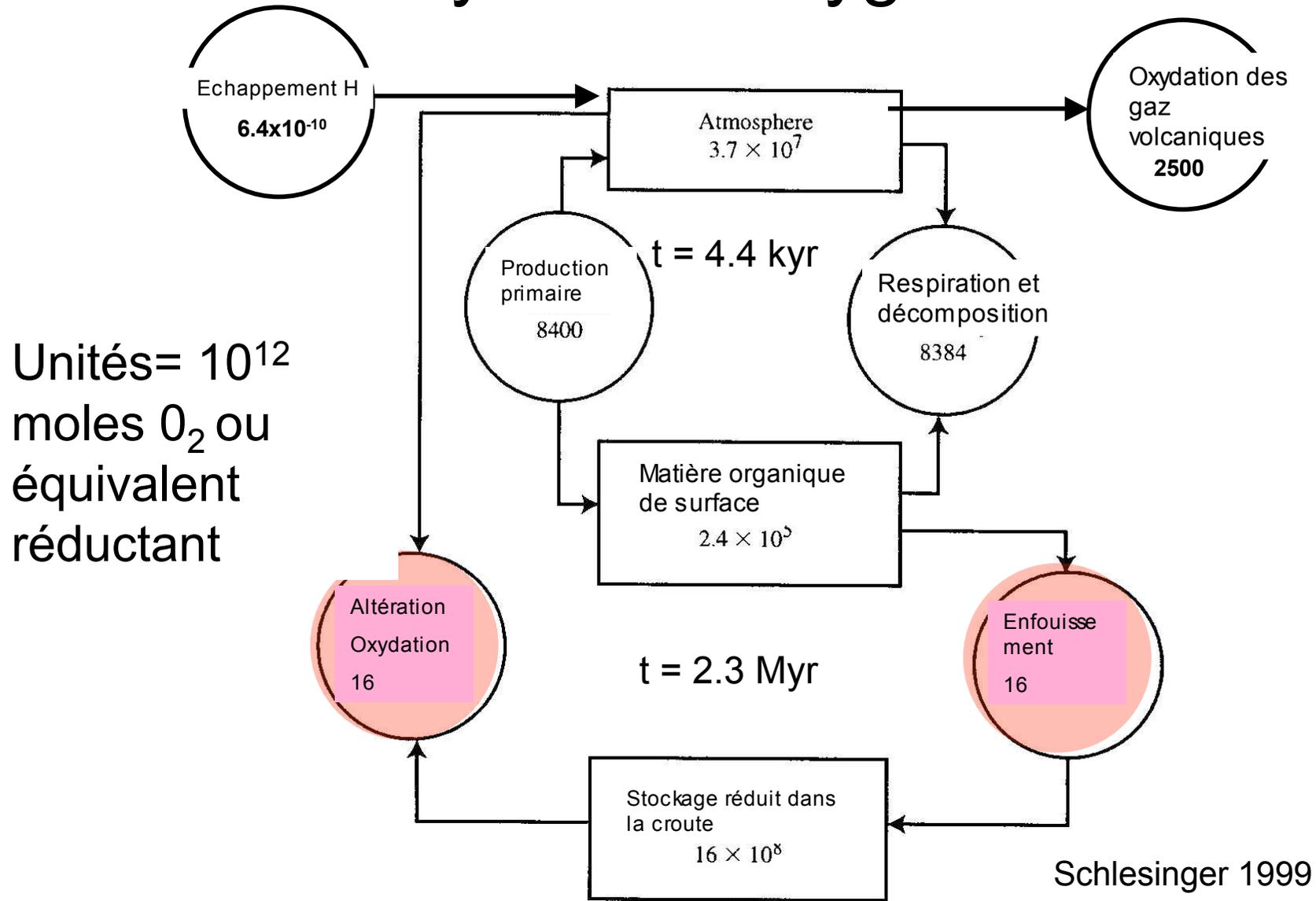
	Terre	Mars	Venus
CO2	345 ppm	0.953	0.965
N2	0.7808	0.027	0.035
O2	0.2095	0.0013	0-20 ppm
H2O	~0.01	300 ppm	50ppm
CH4	3 ppm		/
He	5.2 ppm	/	12ppm
Ne	18 ppm	2.5ppm	7ppm
Ar	0.0093	0.016	70 ppm
Kr	1 ppm	0.3 ppm	0.05-0.7ppm
Xe	0.09ppm	0.08ppm	<0.1ppm

	Terre	Mars	Venus
gravité (ms ⁻²)	9.78 ms ⁻²	3.71ms ⁻²	8.87 ms ⁻²
pression atmosphérique	1 bar	0.007bar	90bar
température de surface	290K	183-268K	730K
distance au soleil	1 UA	1.52 UA	0.72 UA

Cycle de l'azote



Cycle de l'oxygène



Cartes d'identités : Mars

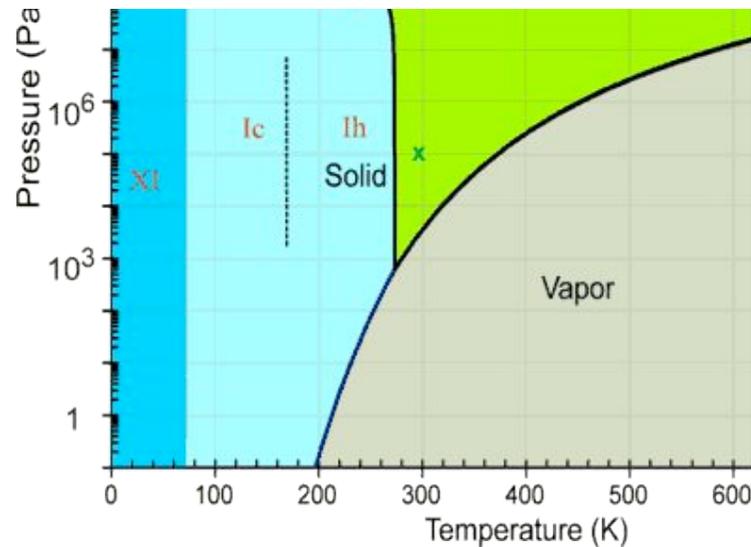
- Atmosphère de CO₂ principalement
- Fortes variations de la pression (échanges atmosphère/surface au niveau des calottes polaires)
- Fortes variations de température jour/nuit

	Terre	Mars	Venus
CO2	345 ppm	0.953	0.965
N2	0.7808	0.027	0.035
O2	0.2095	0.0013	0-20 ppm
H2O	~0.01	300 ppm	50ppm
CH4	3 ppm		/
He	5.2 ppm	/	12ppm
Ne	18 ppm	2.5ppm	7ppm
Ar	0.0093	0.016	70 ppm
Kr	1 ppm	0.3 ppm	0.05-0.7ppm
Xe	0.09ppm	0.08ppm	<0.1ppm

	Terre	Mars	Venus
gravité (ms ⁻²)	9.78 ms ⁻²	3.71ms ⁻²	8.87 ms ⁻²
pression atmosphérique	1 bar	0.007bar	90bar
température de surface	290K	183-268K	730K
distance au soleil	1 UA	1.52 UA	0.72 UA

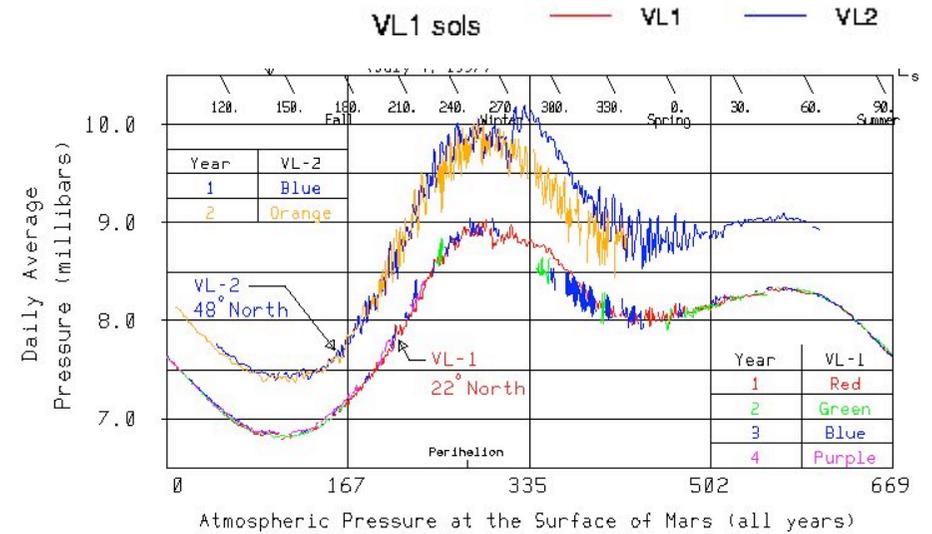
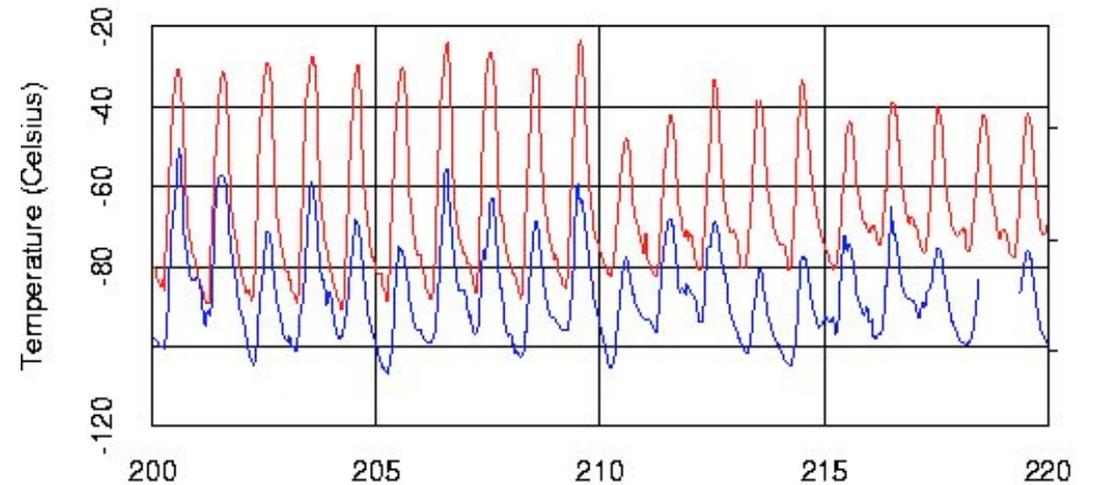
Composition

- Températures très froides
- Pressions très basses

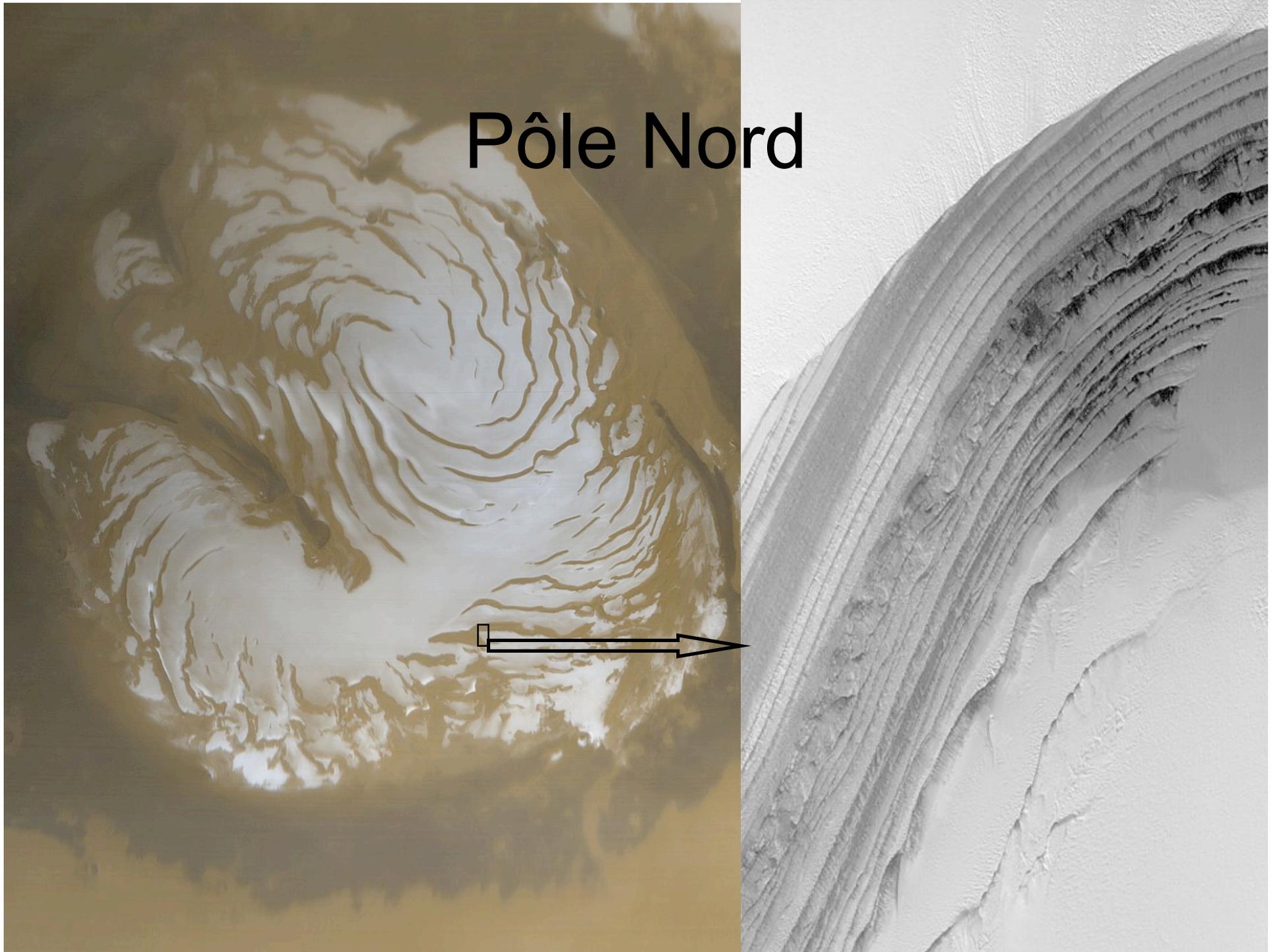


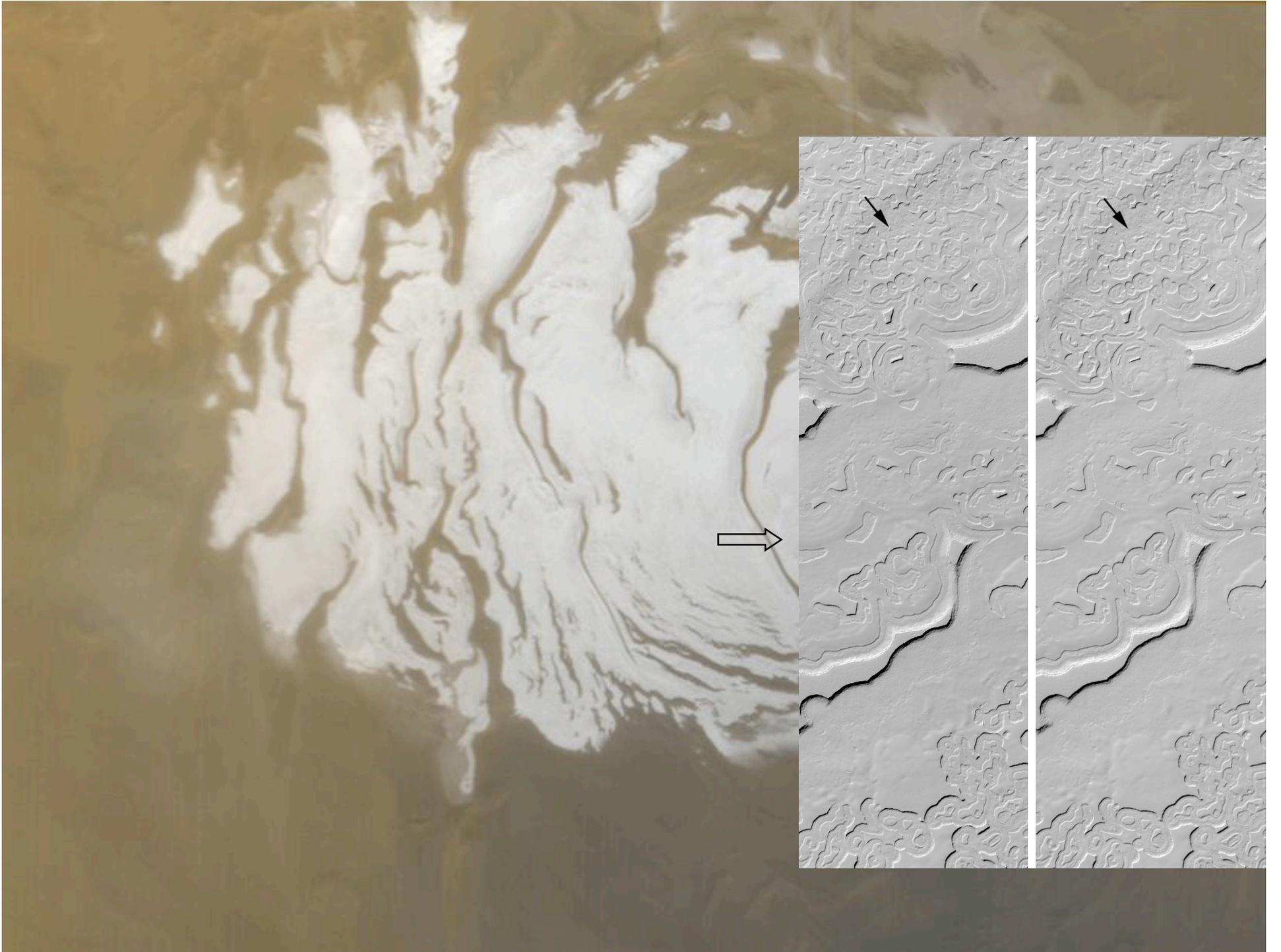
- L'eau liquide ne peut plus exister à la surface...

Mars Temperatures

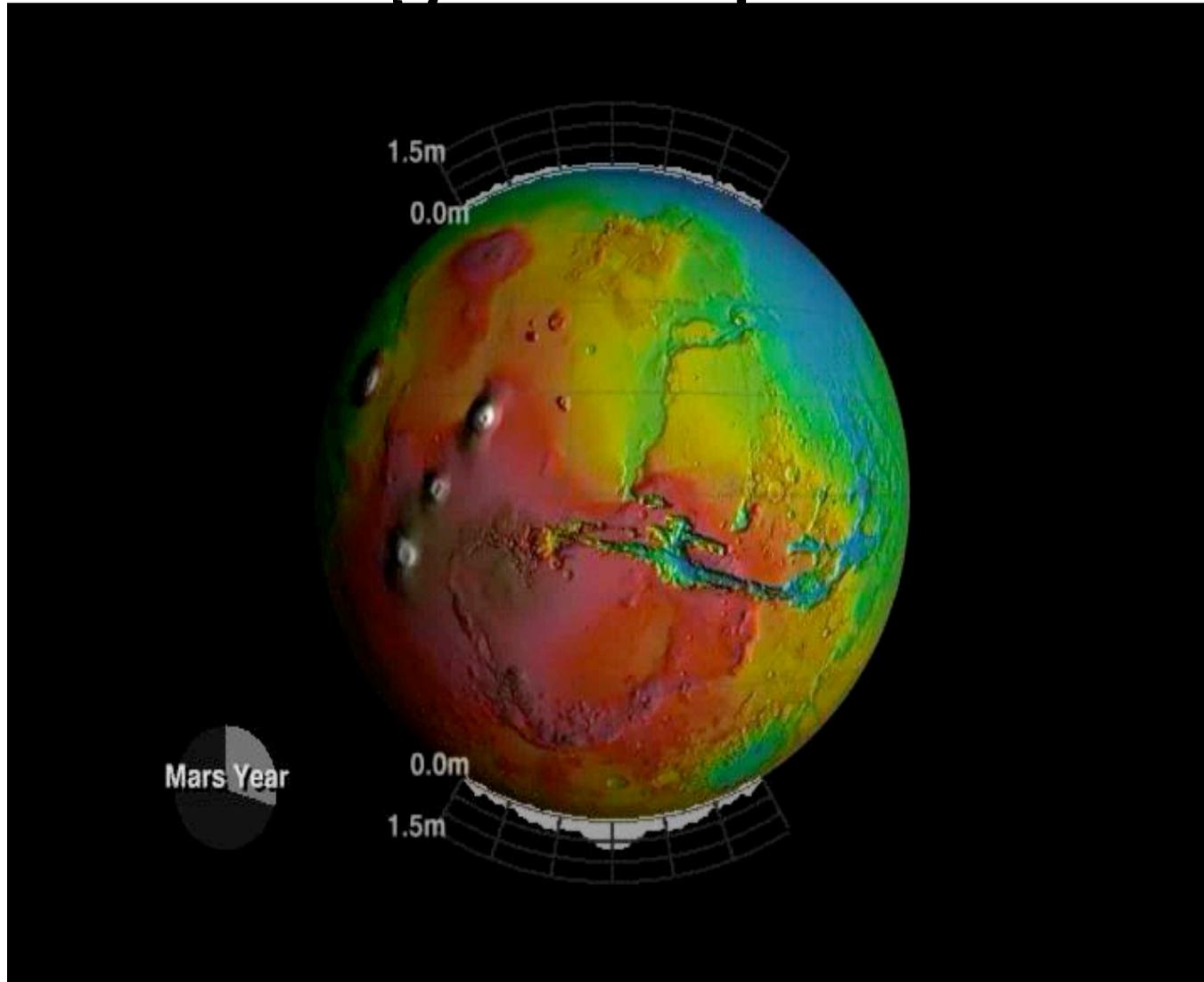


Pôle Nord





Neige aux pôles



**Formation of water ice frost on the surface in winter
(Viking lander 2)**



Venus: carte d'identité

	Terre	Mars	Venus
CO2	345 ppm	0.953	0.965
N2	0.7808	0.027	0.035
O2	0.2095	0.0013	0-20 ppm
H2O	~0.01	300 ppm	50ppm
CH4	3 ppm		/
He	5.2 ppm	/	12ppm
Ne	18 ppm	2.5ppm	7ppm
Ar	0.0093	0.016	70 ppm
Kr	1 ppm	0.3 ppm	0.05-0.7ppm
Xe	0.09ppm	0.08ppm	<0.1ppm

	Terre	Mars	Venus
gravité (ms ⁻²)	9.78 ms ⁻²	3.71ms ⁻²	8.87 ms ⁻²
pression atmosphérique	1 bar	0.007bar	90bar
température de surface	290K	183-268K	730K
distance au soleil	1 UA	1.52 UA	0.72 UA

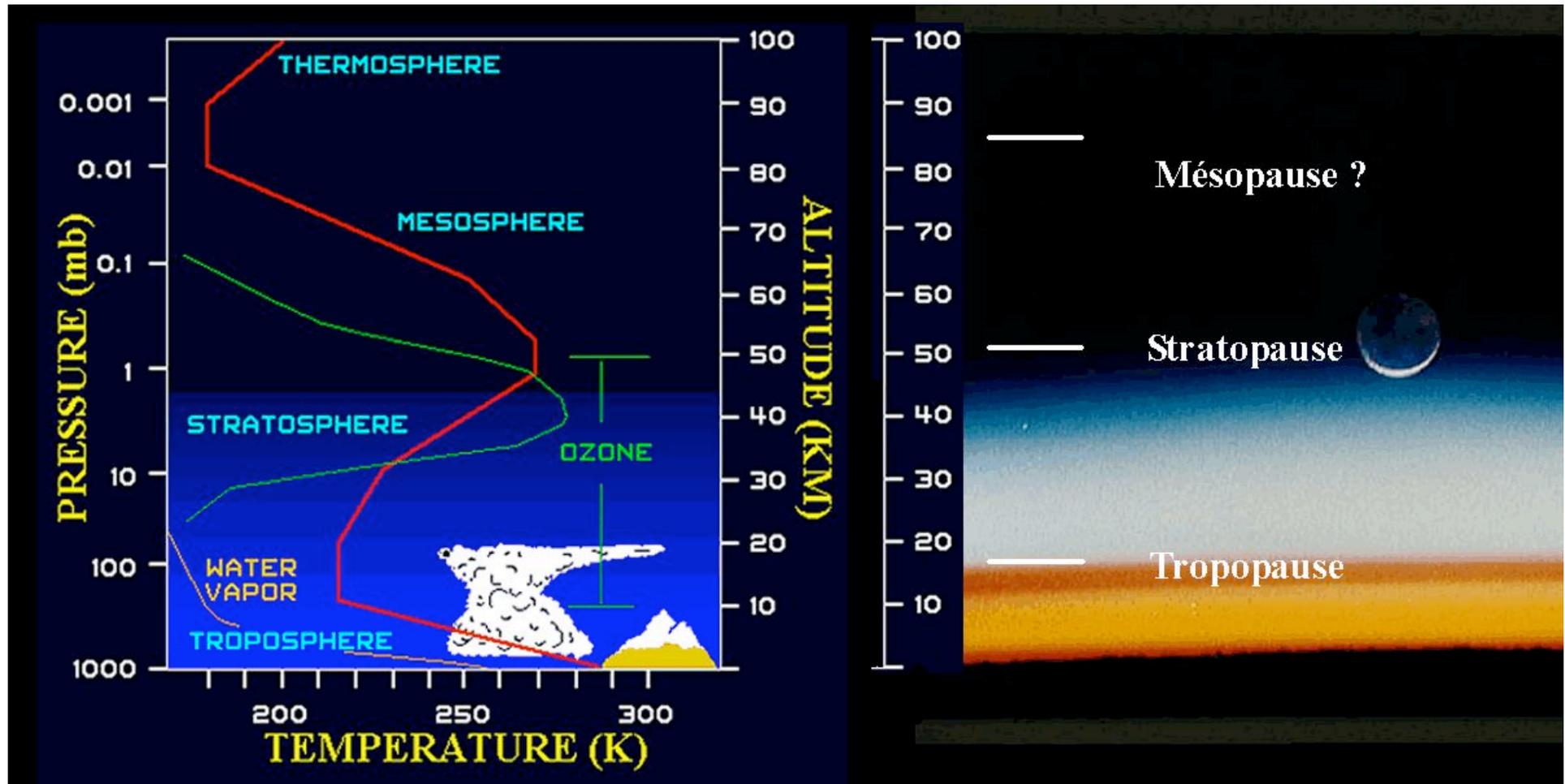
Atmosphère dense de CO₂ (à 95,5 %), densité au sol de 65 kg/m³ et pression de 92 bar

3.5% de N₂ et 130 ppm de SO₂

Même inventaire de N₂ et CO₂ que la Terre mais 100 x plus d'Argon

Nuages composés de H₂SO₄, mais réaction chimique à la surface qui fixe le soufre: apport de soufre nécessaire (volcanisme?)

Structure de l'atmosphère



Les différentes parties de l'atmosphère

- **Troposphère (jusqu'à 13 km d'altitude aux latitudes moyennes)**
 - Forte humidité de l'eau et changements d'états de l'eau (nuages =glace/eau, pluie=eau, humidité = vapeur d'eau)
 - Décroissance de la pression avec l'altitude
 - Turbulences et convection (chauffage solaire du sol)
 - L'altitude de la tropopause varie entre 7-8 km aux pôles à 17-18 km dans les régions intertropicales
- **Stratosphère (entre 13 km et 50 km)**
 - Inversion de température à la tropopause et augmentation de la température dans la stratosphère
 - Polluants et poussières y stagnent
- **Mésosphère**
 - Pas de mélanges homogènes des gaz
 - Ségrégation des gaz par gravité (importance des masses moléculaires)
 - Collisions entre gaz de plus en plus rares =>apparition progressive de composés atomiques (H, O, N)
- **Thermosphère**
 - Ionisation importante, hautes températures

Structure de l'atmosphère à l'équilibre

- Equilibre dynamique

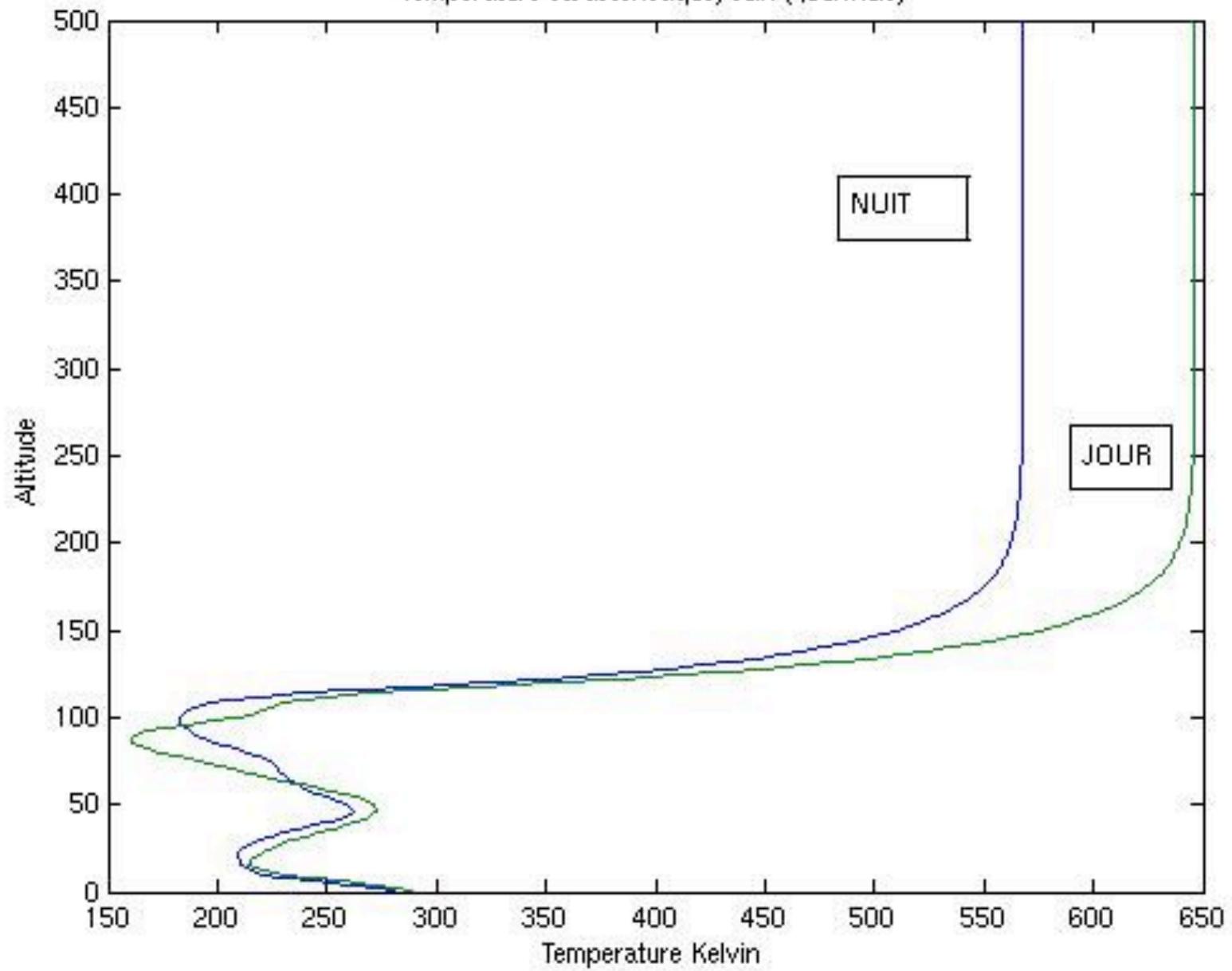
$$-\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} = \vec{0}$$

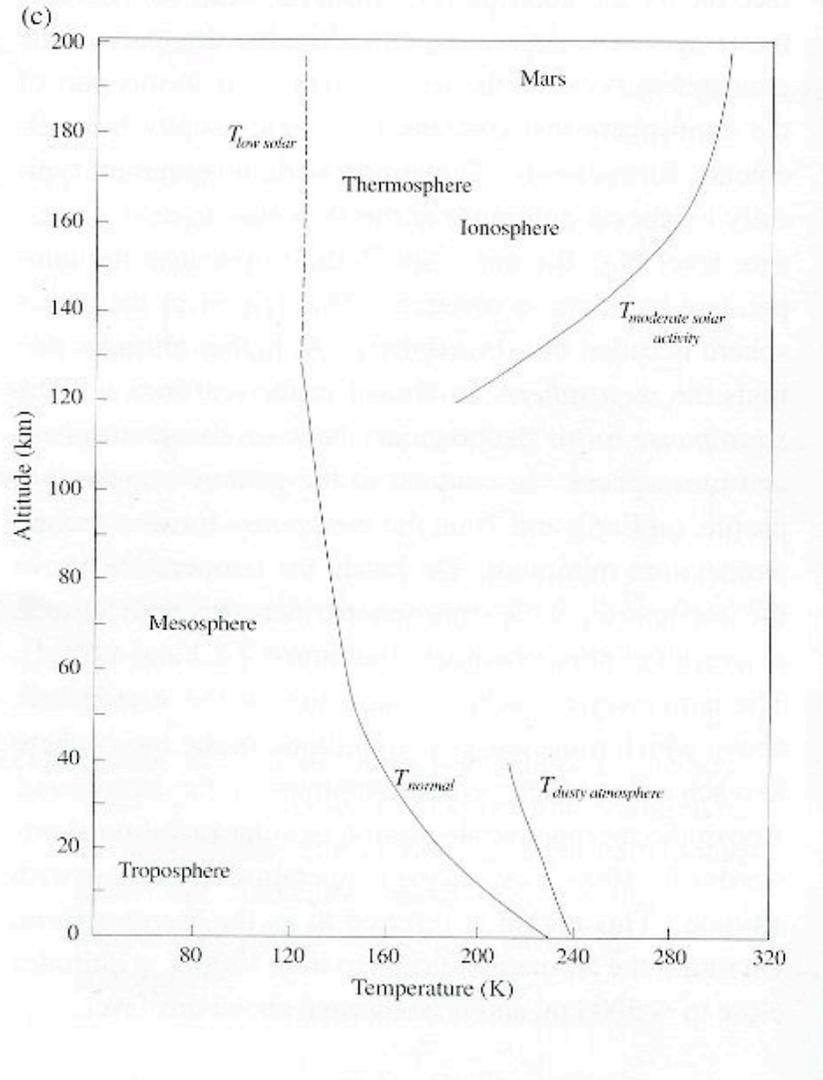
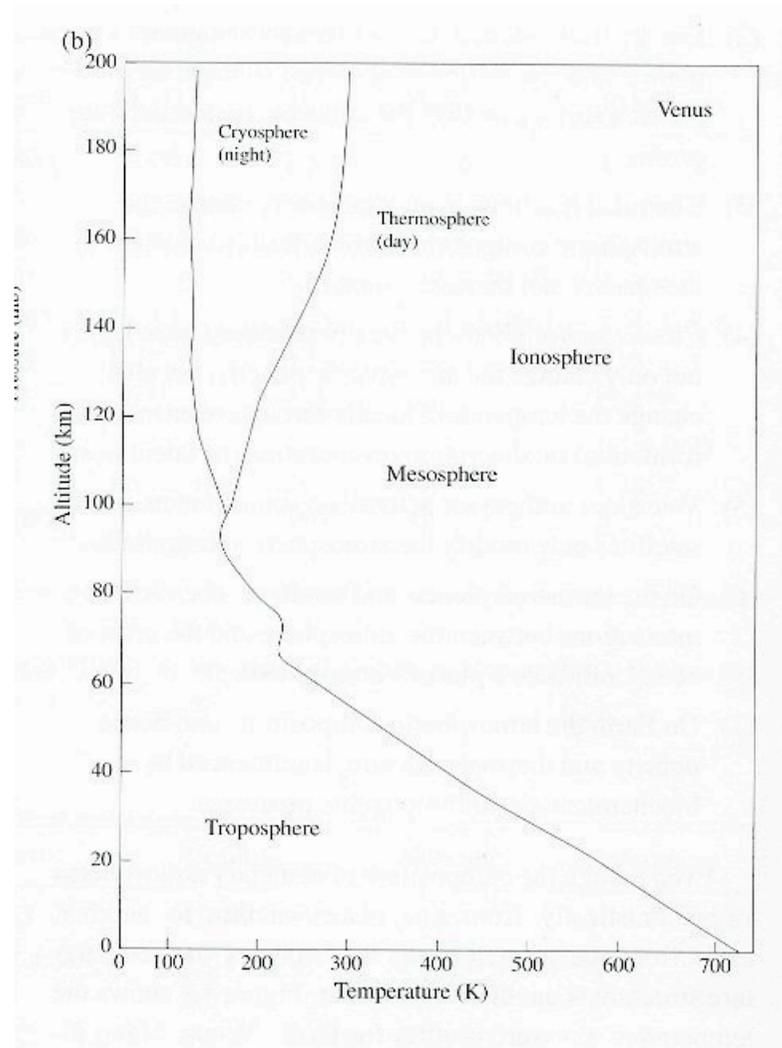
- Equilibre thermodynamique

$$dH = c_p dT = VdP + \delta Q = \frac{1}{\rho} dP + \delta Q$$

- dQ = chaleur perdue/gagnée par conduction thermique et par rayonnement (pas de convection à l'équilibre)

Temperature caractéristique, Juin (jour/nuit)





Atmosphère isotherme

- Equilibre dynamique

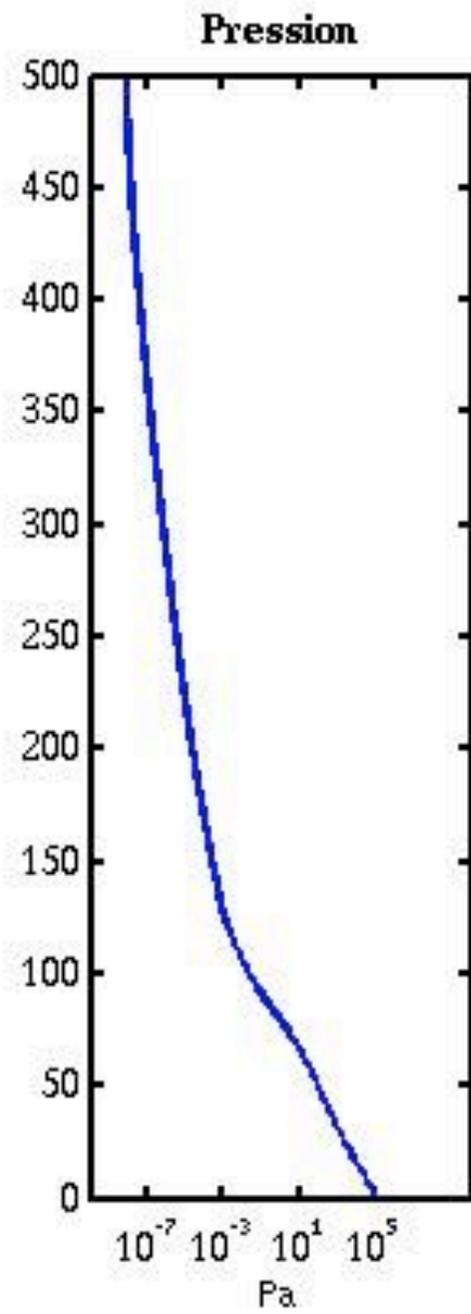
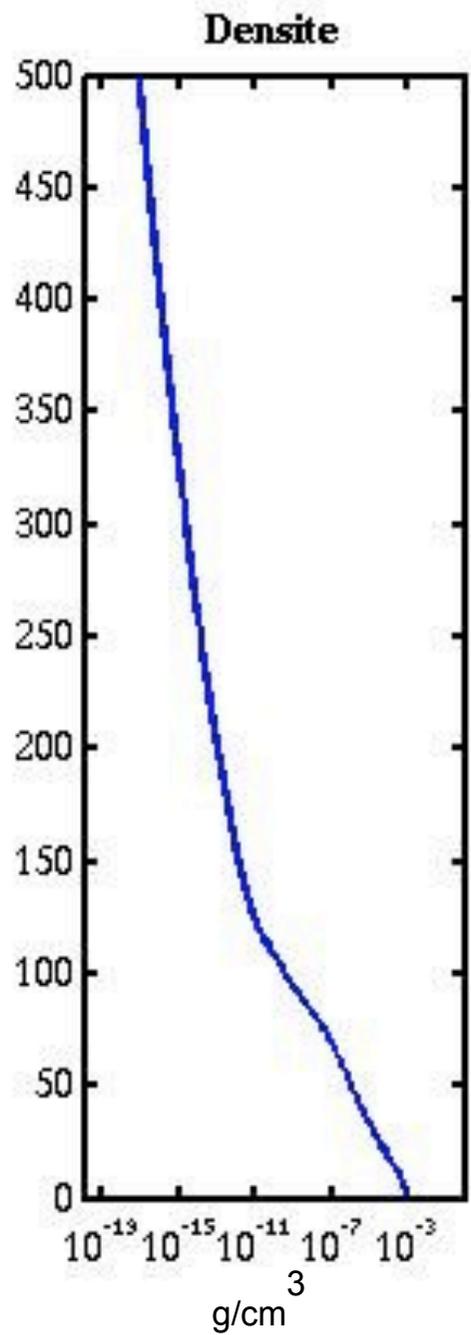
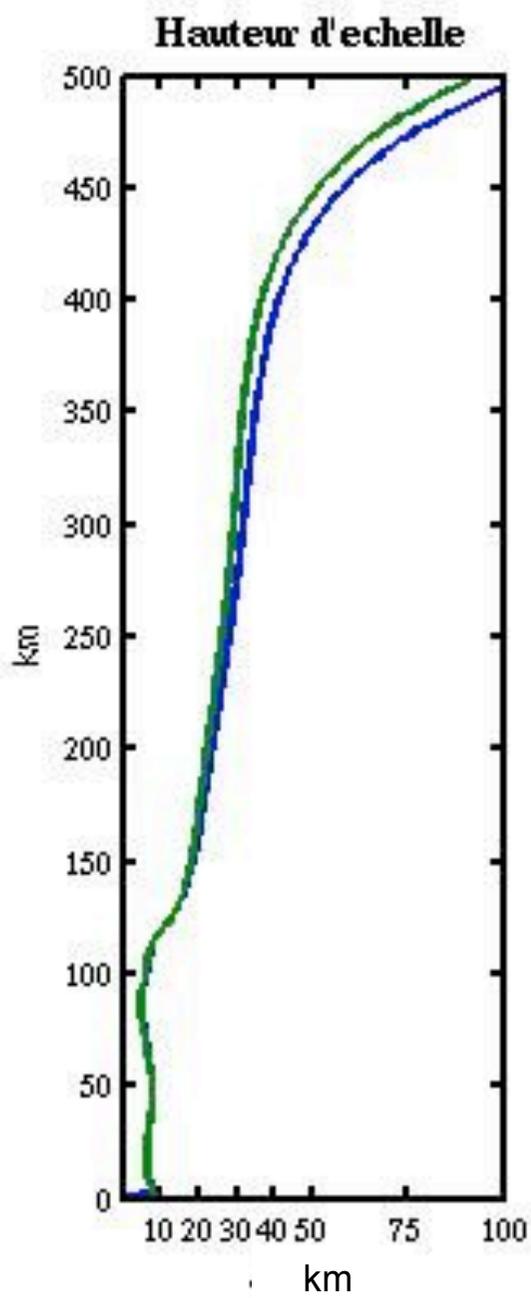
$$-\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} = \vec{0}$$

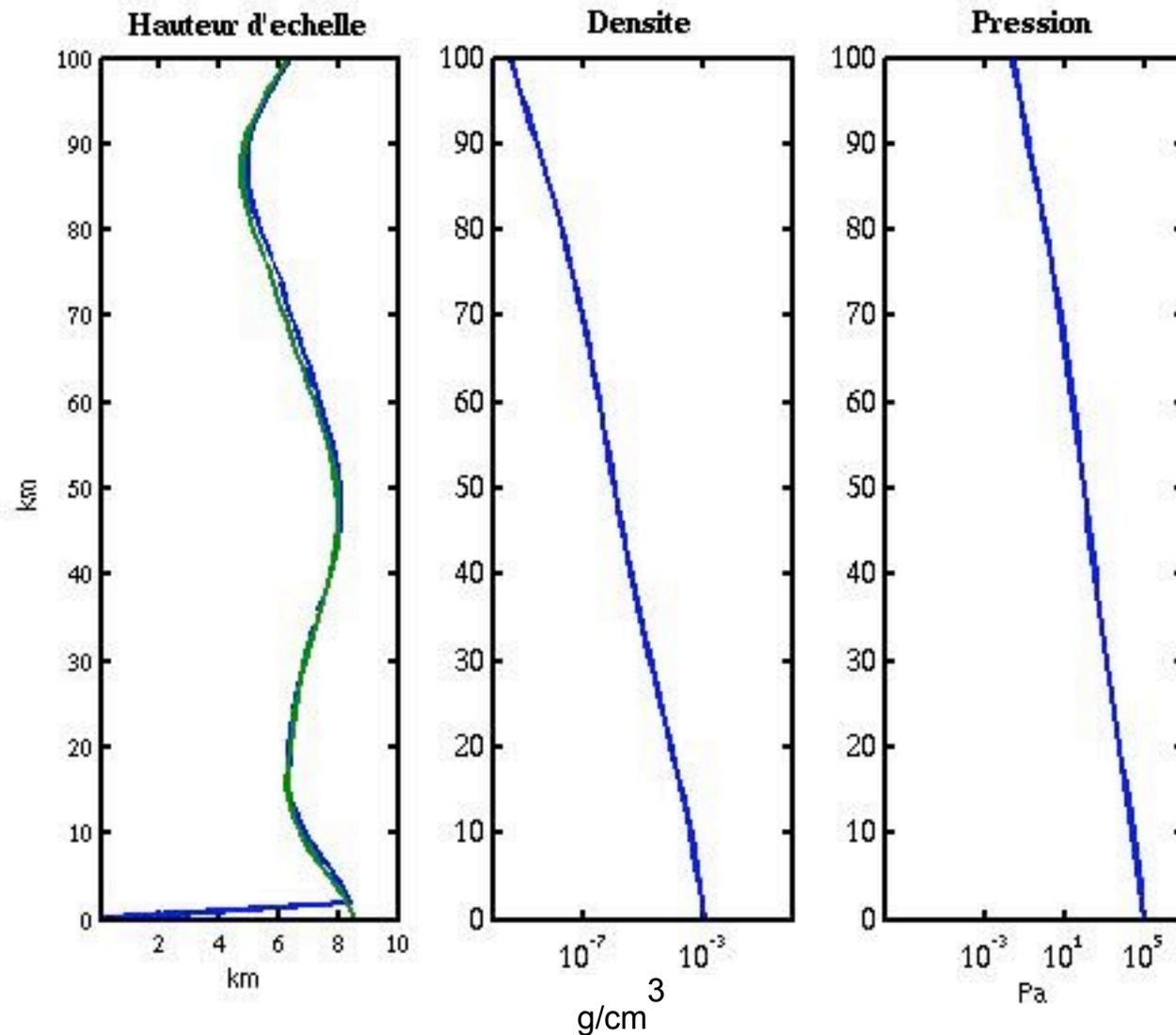
- Gaz parfaits

$$P = \frac{\rho RT}{M}$$

- M (masse molaire moyenne), R constante des gaz parfaits, T température

$$P(z) = P_0 \exp\left(-\frac{Mgz}{RT}\right)$$





- Hauteur d'échelle ~ 8 km dans les 100 premiers km
- Hypothèse isotherme localement bonne (avec la température locale)

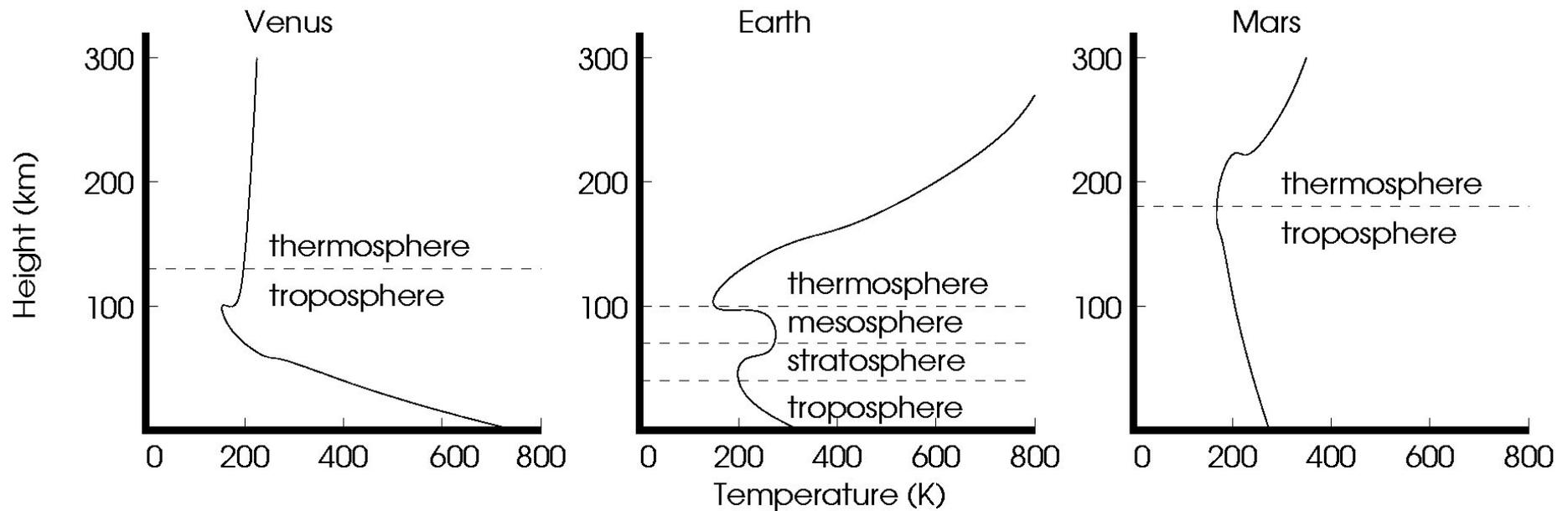
Structure thermique dans la basse atmosphère

- Dans les premiers km, effet de décompression (température diminue)
- Si l'atmosphère est à l'équilibre... la décompression est a priori adiabatique

$$\frac{dT}{dz} = - \frac{g}{c_p}$$

	Terre	Mars	Venus
M (gr)	29	44	44
	288	218	730
Cp/R	3,45894	4,2324	6,0025
g	9,78	3,71	8,87
dT/dz	-9,8553	-4,6357	-7,8149

	A	B (kK)-1	C (kK)-2
N2	3,247	7,12E-01	-0,041
O2	3,068	1,638	-0,512
CO2	3,206	5,082	-1,714
Air	3,209	0,907897	-0,1406



- Comparaison Observation/gradient adiabatique

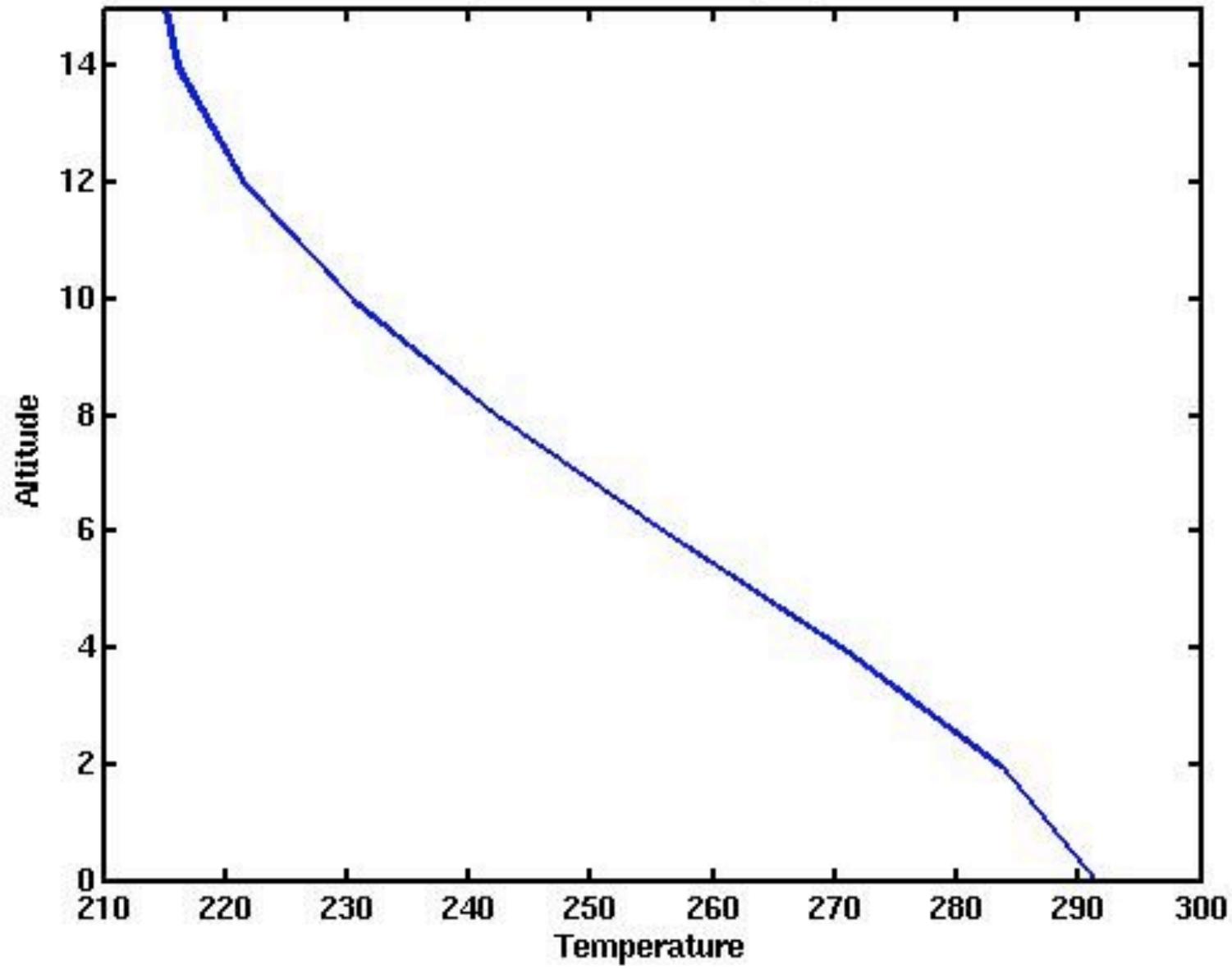
Terre: -6.5 K/km ($-9,8 \text{ K/km}$)

Mars : -2.5 K/km ($-4,5 \text{ K/km}$)

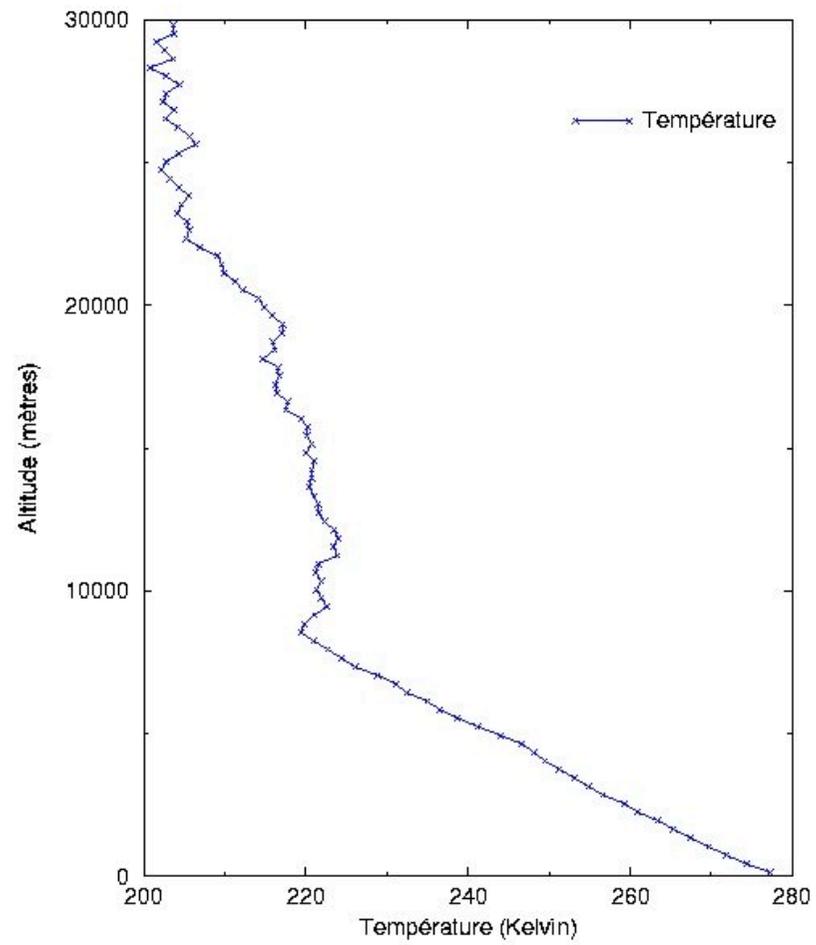
Venus : -7.7 K/km (-7.8 K/km)

- Il manque une source « de chauffage » dans la troposphère

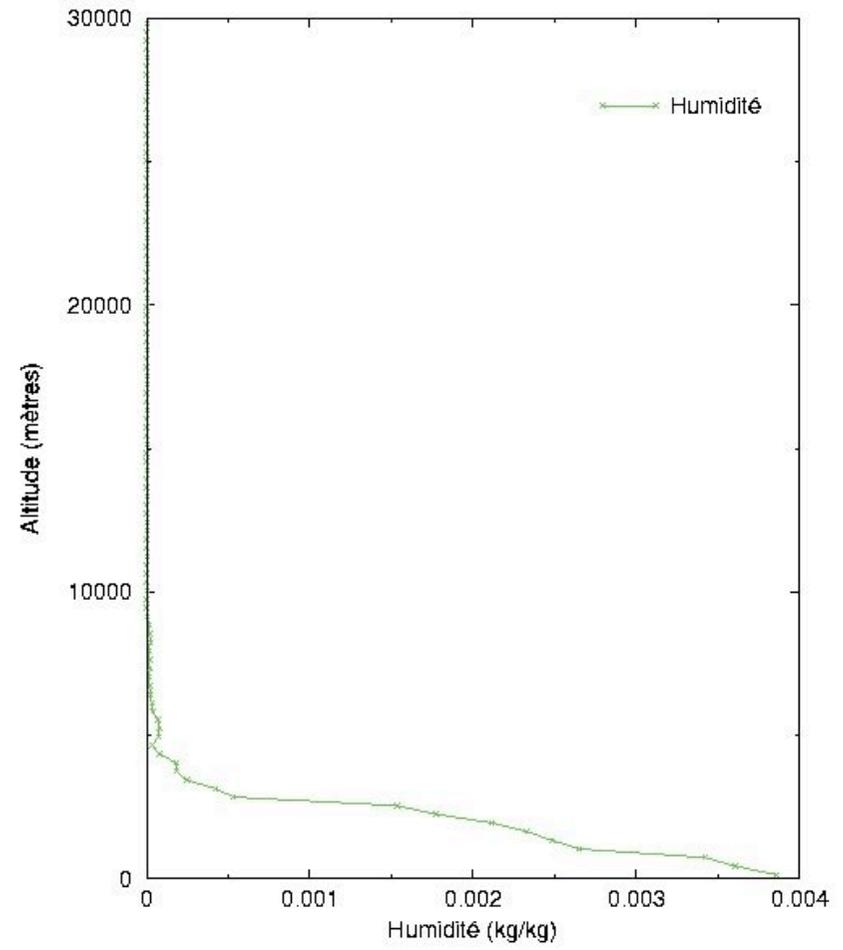
Temperature dans la troposphere

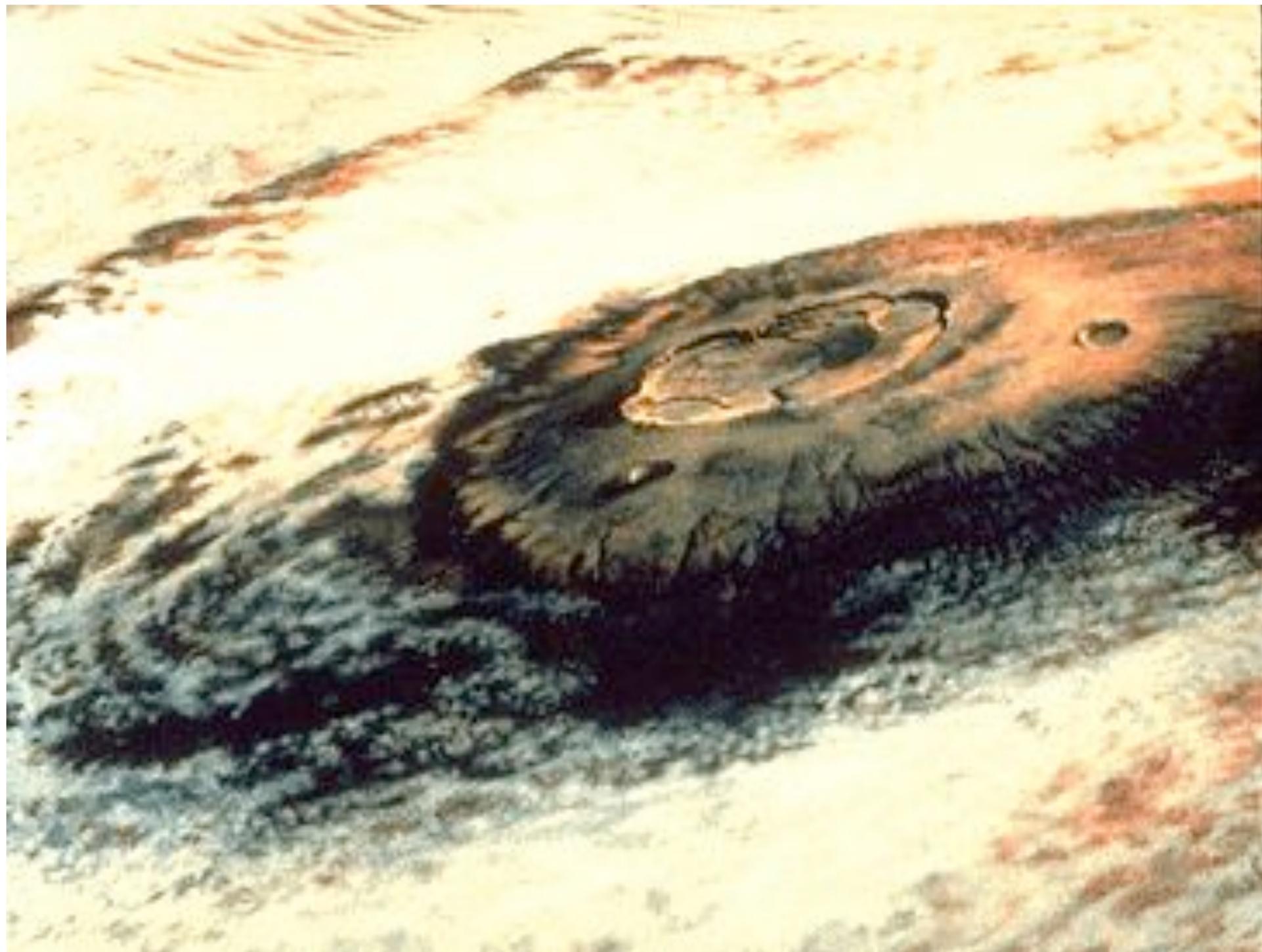


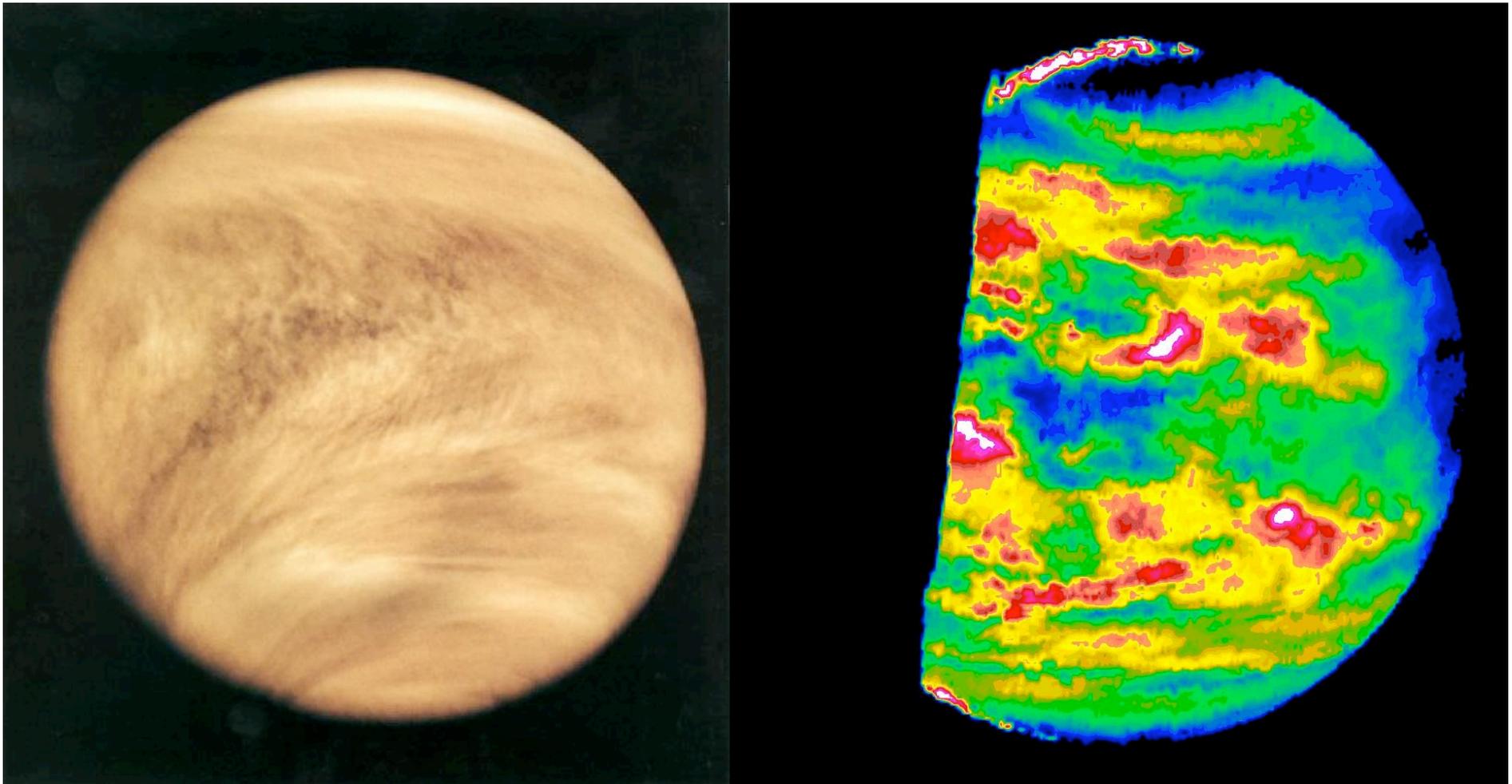
Température observée



Humidité observée





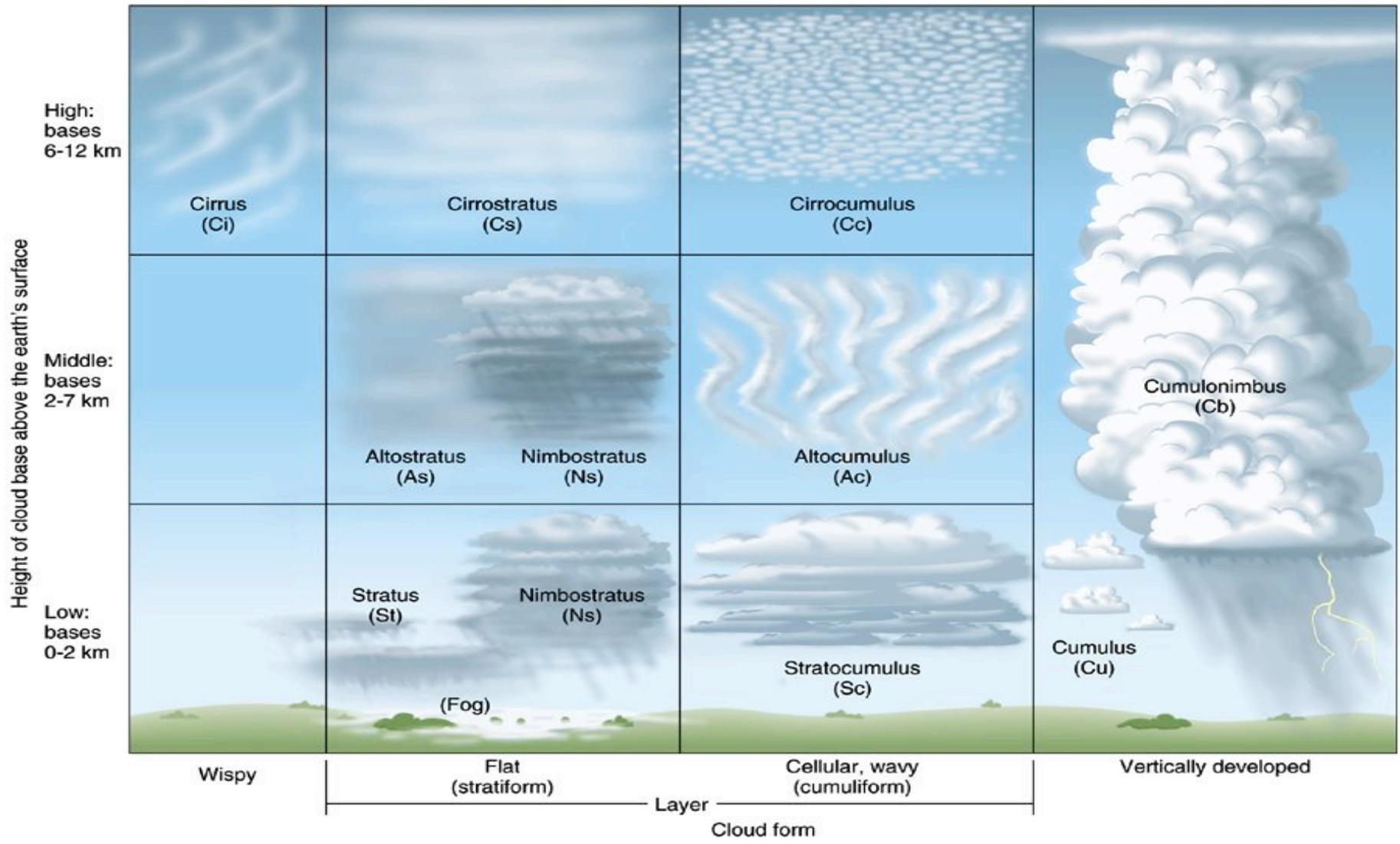


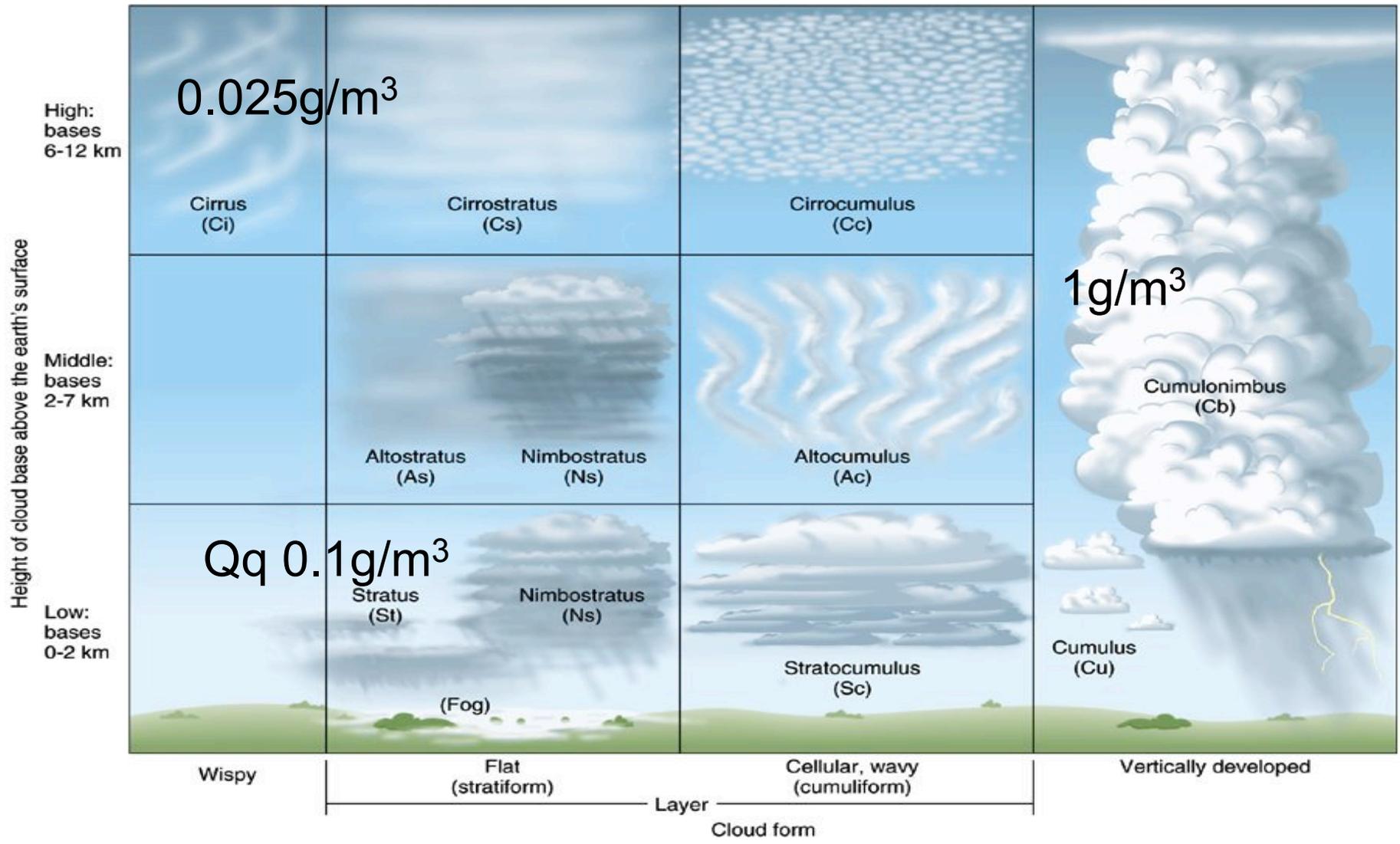
- Venus

Nuages d'acide sulfurique

Surface invisible

Couverture à haute altitude (30-90 km avec l'essentiel des nuages entre 45 et 70 km)





Gradient adiabatique humide

$$c_p dT = \frac{1}{\rho} dP - L_s dw_s$$

$$\frac{dT}{dz} = - \frac{g}{c_p + L_s \frac{dw_s}{dT}}$$

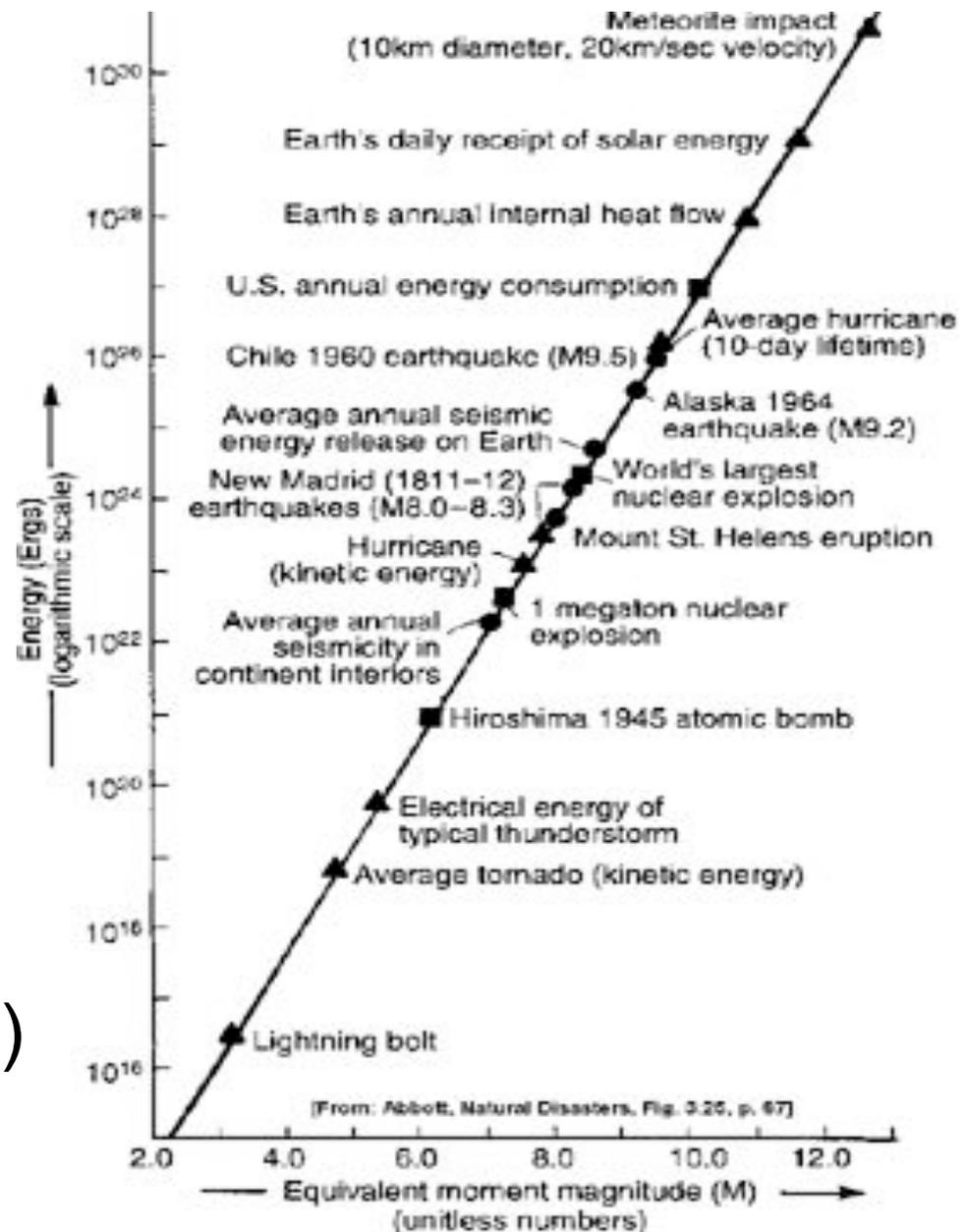
- W_s = masse de vapeur d'eau par gramme d'air,
 L_s = chaleur latente de condensation
- Le gradient humide est de l'ordre de - 5-6 K/km

Température de surface

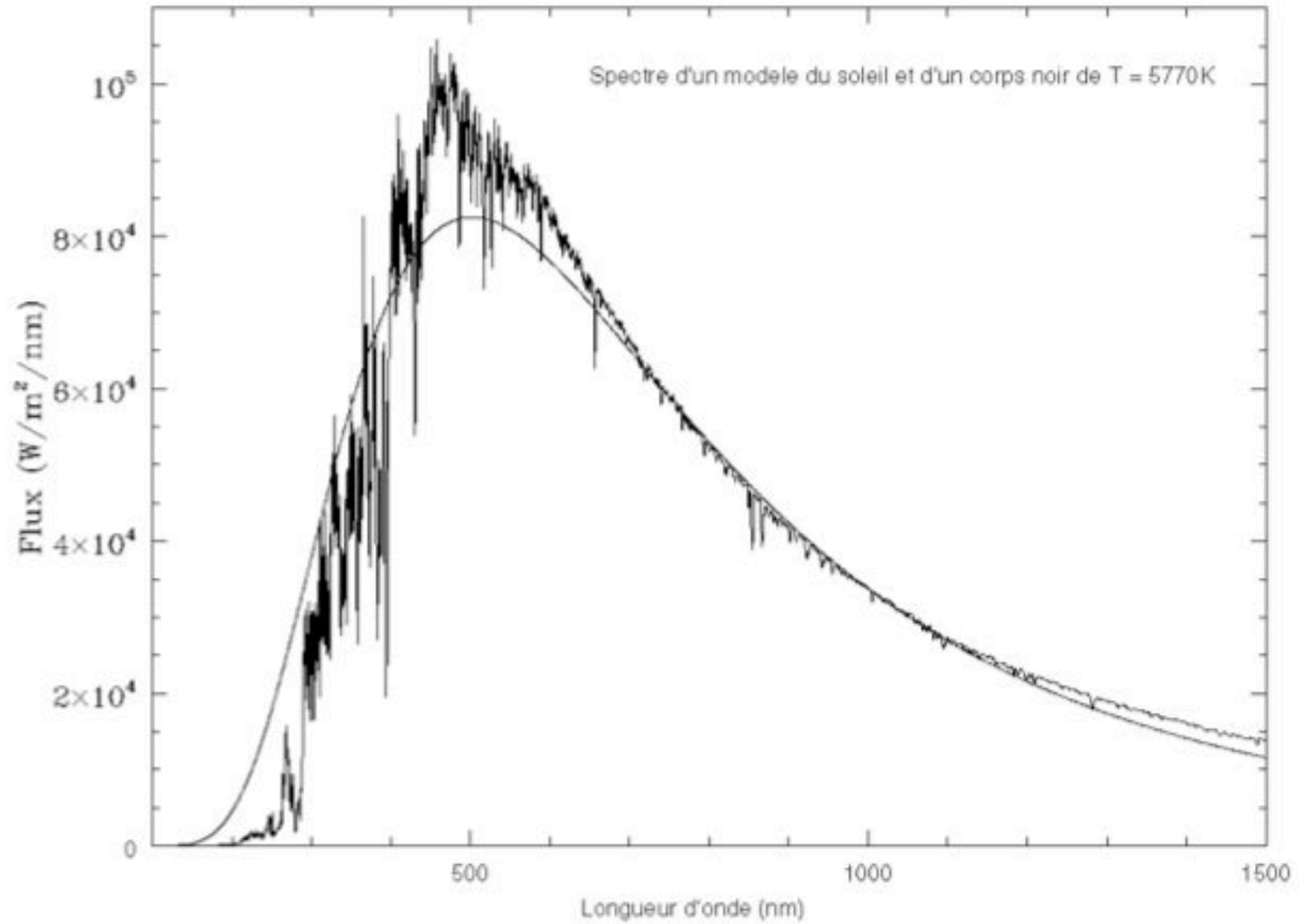
Paramètres importants

- Flux d'énergie
 - Luminosité du soleil: $3.8 \cdot 10^{26}$ W (sphère de 700 000 km avec une température de surface de 5770K)
 - Flux solaire ~ 1360 W/m²
 - Flux d'origine interne (Terre) $\sim 60-80$ mW/m²
 - Le flux solaire est LA source principale d'énergie pour les planètes telluriques (pas tout à fait vrai pour les planètes géantes, en raison d'un flux interne important)
- Absorbtion/ré-émission de cette énergie
- Inertie thermique

- Energie (1 erg = 10^{-7} J)
- $4.65 + 3/2 M_w = \log E$



Le spectre du Soleil

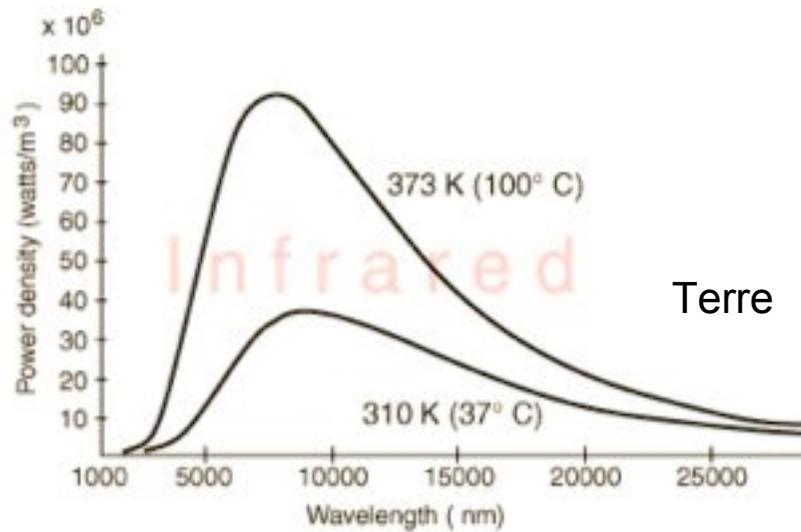
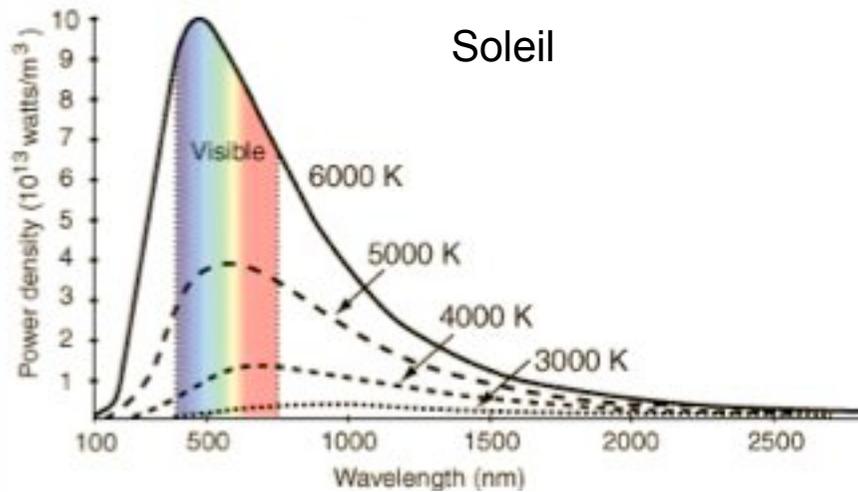


Théorie du corps noir

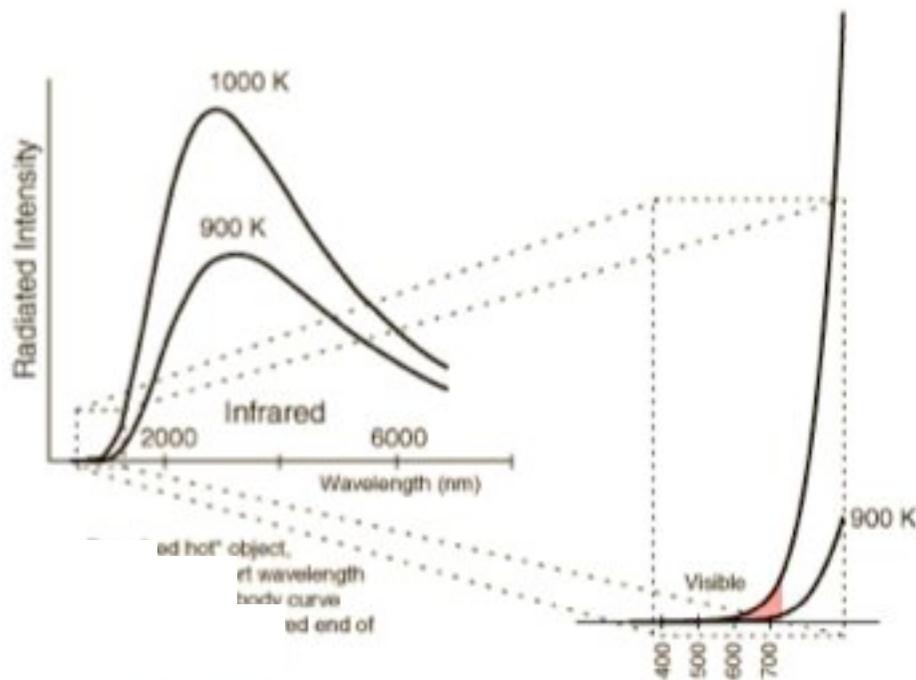
- La loi de Planck donne la répartition suivant la longueur d'onde du flux d'un corps noir à la température T.

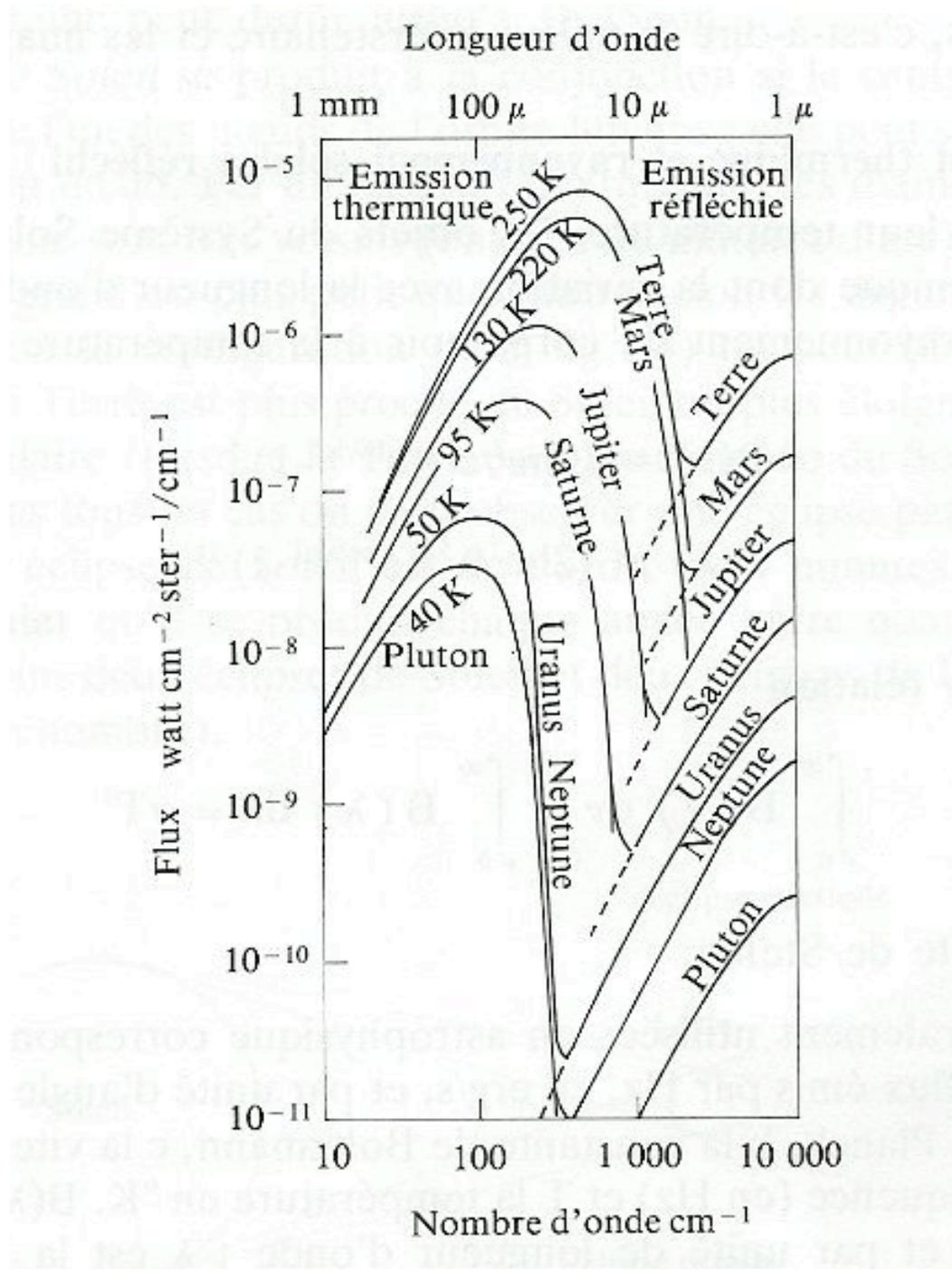
$$d\Psi = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k_B \lambda T}} - 1} d\lambda$$

- H=constante de Planck = $6.63 \cdot 10^{-34}$ Js
 - K_b =constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/s
 - c=vitesse de la lumière 300 000 km/s
 - λ =longueur d'onde
 - T= température du corps noir
- Le maximum est pour une longueur d'onde donné par $\lambda_m T = 2880 \mu\text{m K}$ (Loi de Wien)



Corps rouge
À 1000 K





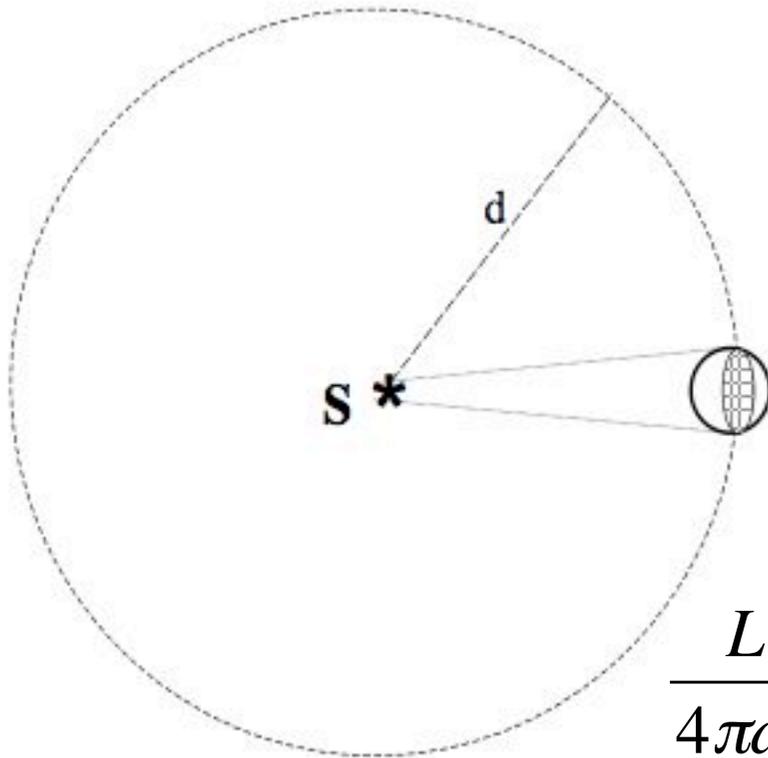
Rayonnement du corps noir

- L'énergie totale est cependant donnée par une relation simple

$$\Phi = \sigma_S T^4$$

- Avec σ =constante de Stefan = $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
- Ordres de grandeur
 - $4.6 \mu\text{W}/\text{m}^2$ pour 3K (big-bang)
 - $500 \text{ W}/\text{m}^2$ pour 300K (Terre)
 - $73 \text{ MW}/\text{m}^2$ pour 6000 K (Soleil)

Température des planètes Flux reçu et équilibre thermique



$$\text{Flux reçu} = L / (4\pi d^2)$$

$$\text{Surface interceptant ce flux} \\ = \pi R_p^2$$

A l'équilibre :
puissance reçue = puissance émise

$$\frac{L}{4\pi d^2} \pi R_p^2 = 2\pi R_p^2 \sigma T^4$$

(émission jour/nuit sur une demi surface due à une rotation lente, ex Venus)

$$\frac{L}{4\pi d^2} \pi R_p^2 = 4\pi R_p^2 \sigma T^4$$

(émission sur toute la surface due à une rotation rapide, ex Jupiter ou Saturne)

Notion d 'albédo

Une partie du rayonnement reçu est réfléchi ...

Le bilan énergétique s'écrit alors :
énergie reçue = énergie réfléchie + énergie absorbée
et
énergie absorbée = énergie réémise

La fraction (énergie réfléchie / énergie reçue)
est appelée *albédo* (noté A).

On a donc :

$$\frac{L}{4\pi d^2} (1 - A)\pi R_p^2 = 2\pi R_p^2 \sigma T^4$$
$$T = (1 - A)^{1/4} \frac{324}{\sqrt{D}}$$

(rotation lente)

$$\frac{L}{4\pi d^2} (1 - A)\pi R_p^2 = 4\pi R_p^2 \sigma T^4$$
$$T = (1 - A)^{1/4} \frac{273}{\sqrt{D}}$$

(rotation rapide)

Notion d'albédo (suite)

La valeur de l'albédo est déterminé par les propriétés de la surface d'incidence :

- les propriétés "géométriques" :

une surface lisse réfléchit mieux qu'une surface accidentée (cratères météoritiques, poussières ...)

- les propriétés physico-chimiques :

par exemple, la glace est un meilleur réflecteur que l'eau liquide.

⇒ sur une planète donnée :
variations géographiques et saisonnières.

Albédo et science fiction:

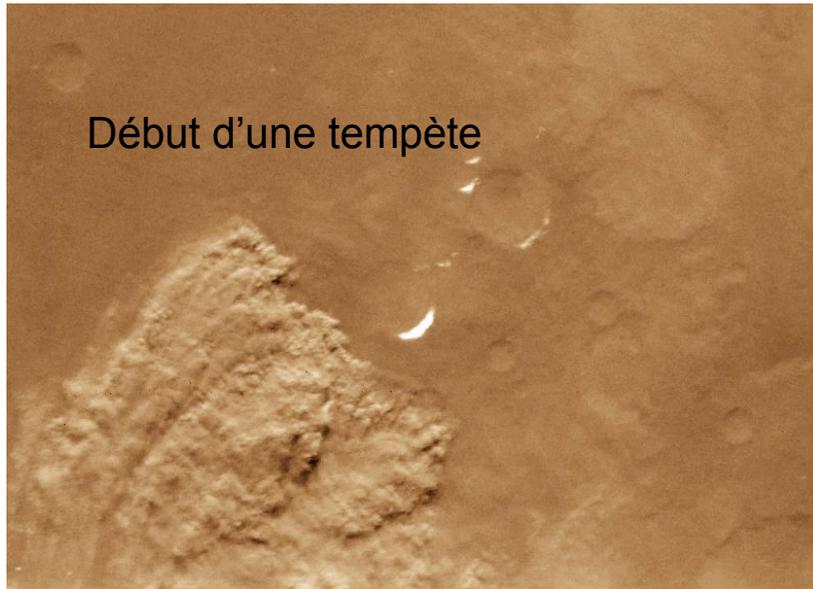
Ewok (forêts) = 24°C

Hoth (glace) -52°C

Dune (désert) 13°C

Okeanos (Star Trek) ou Water World (32°C)



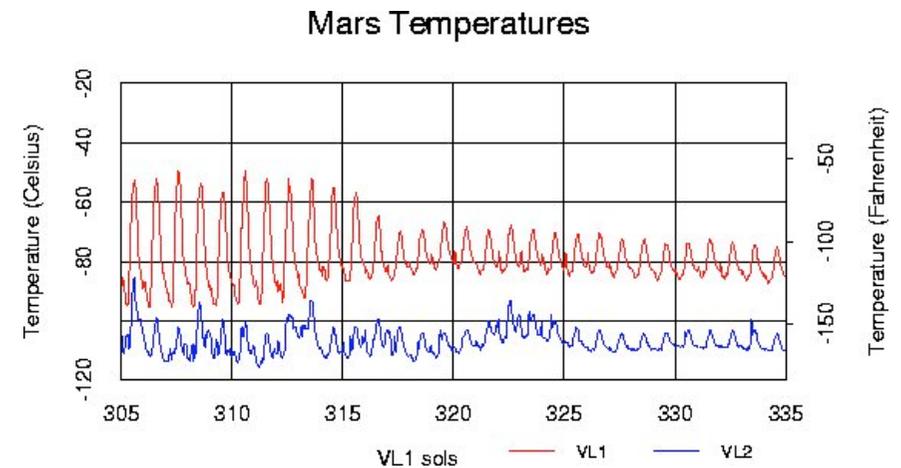
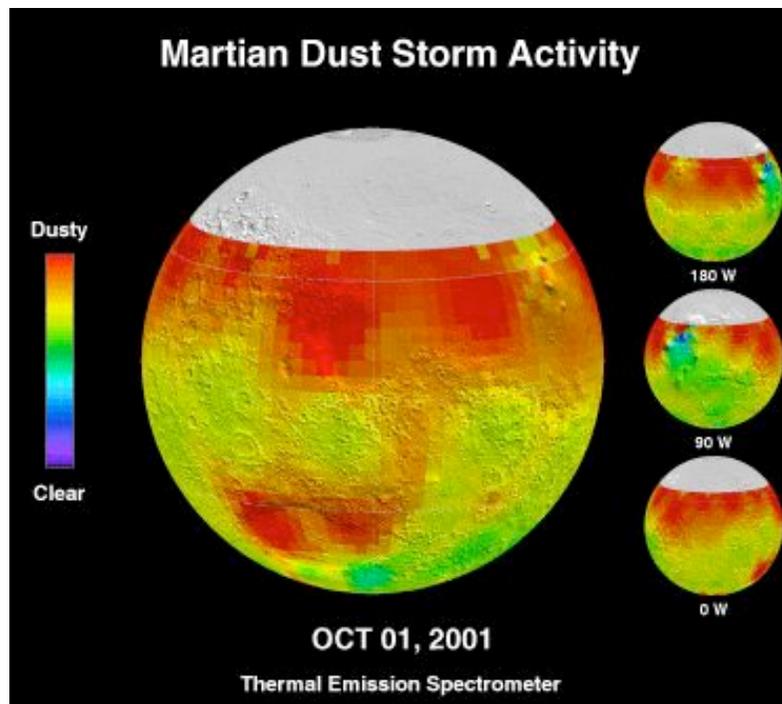


Début d'une tempête

développement

Exemple de tempête sur Mars

- Impact sur la température de surface



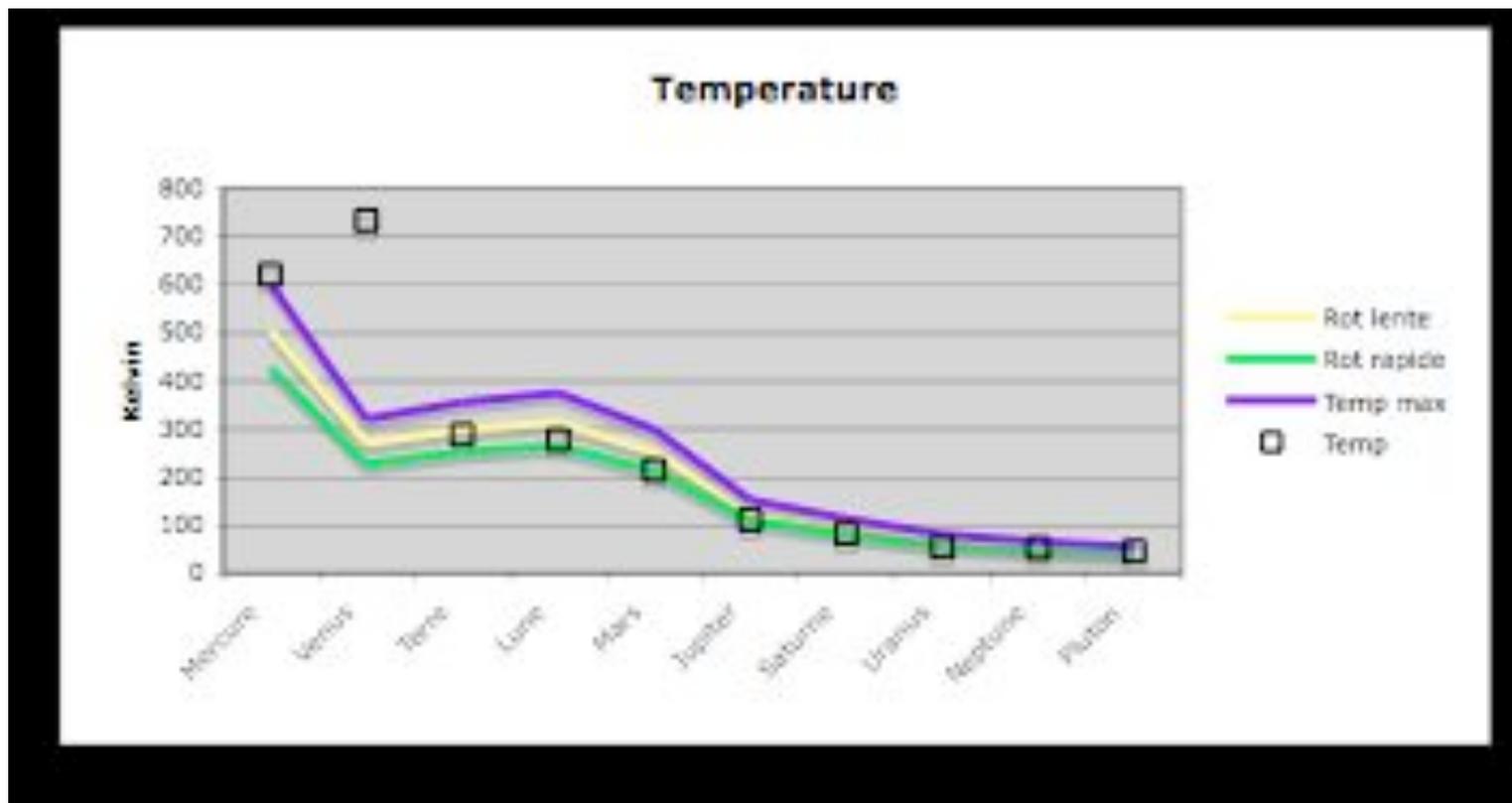
Température maximum

- Au tropiques (insolation perpendiculaire à la surface et sans protection/inertie)

$$\frac{L}{4\pi d^2} (1 - A) = \sigma T^4$$

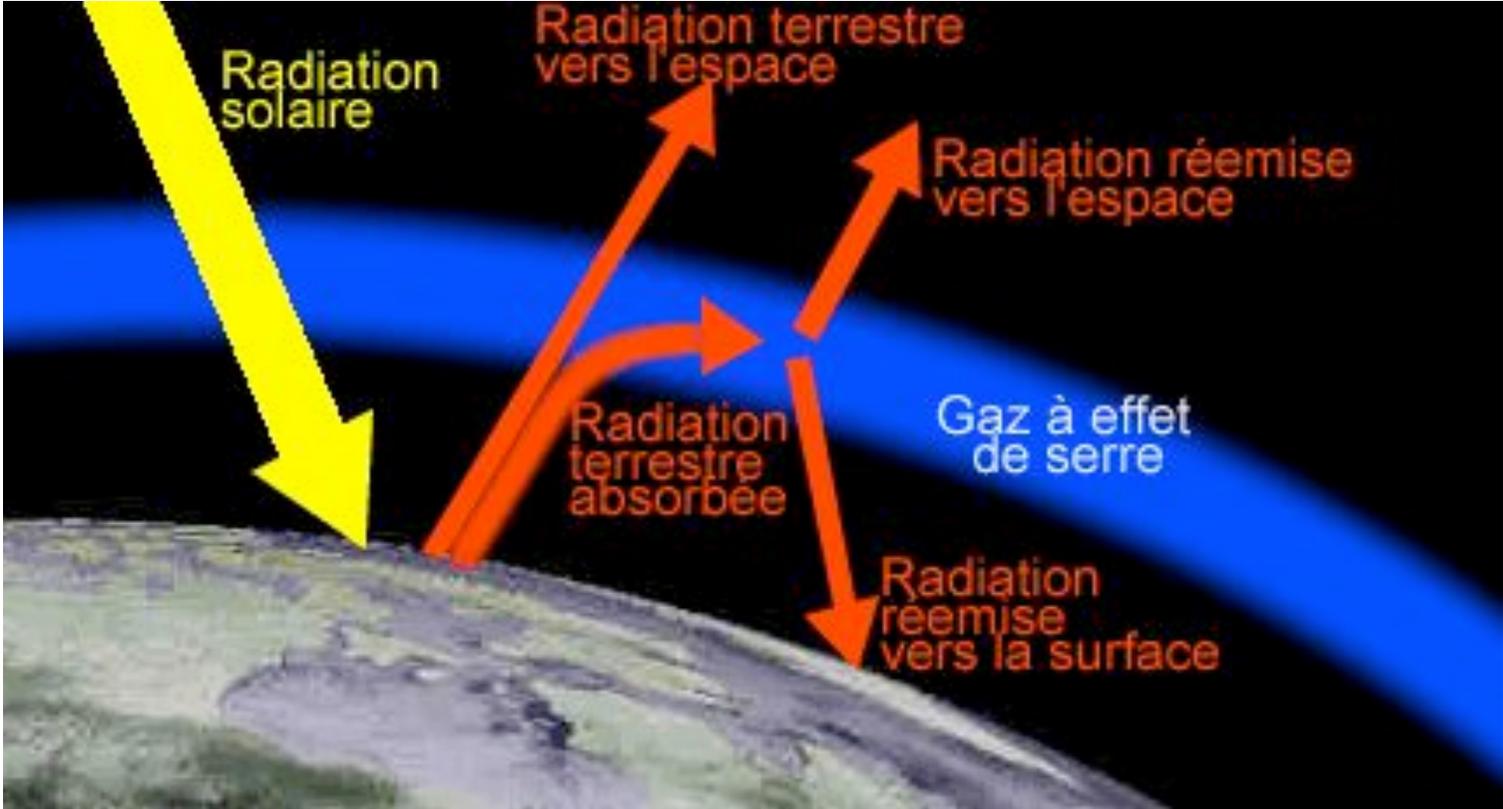
$$T = (1 - A)^{1/4} \frac{386}{\sqrt{D}}$$

	Distance	Albedo	Rot lente	Rot rapide	Temp max	Temp
Mercure	0,387	0,119	504,58	425,16	601,1402	620
Venus	0,723	0,75	269,44	227,03	320,9986	733
Terre	1	0,29	297,41	250,6	354,3251	288
Lune	1	0,123	313,54	264,19	373,5401	277
Mars	1,524	0,16	251,26	211,71	299,3399	215
Jupiter	5,203	0,343	127,88	107,75	152,3533	111
Saturne	9,543	0,342	94,462	79,593	112,5386	82
Uranus	19,19	0,29	67,893	57,206	80,88433	53
Neptune	30,07	0,31	53,851	45,374	64,15535	52
Pluton	39,48	0,4	45,383	38,239	54,06753	45



Différences...

	Vénus	Terre	Mars
Température de surface	735K	288K	215K
Température effective	269K	251K	212K
Gaz à effet de serre	CO ₂ , H ₂ O, SO ₂ , CO et nuages H ₂ SO ₄	H ₂ O, CO ₂ +...	CO ₂
DT effet de serre	466K	37K	3K



- flux solaire reçu à la surface de l'atmosphère : constante solaire : C
- fraction réfléchiée par l'atmosphère : albédo de l'atmosphère : A_{atm}
- fraction réfléchiée par la Terre : albédo de la Terre : A_T
- coefficient d'absorption de l'atmosphère : Q_{abs}

Surface réceptrice = πR_T^2 ; surface rayonnante = $4 \pi R_T^2$
 (la moitié de la Terre est dans la nuit ...)

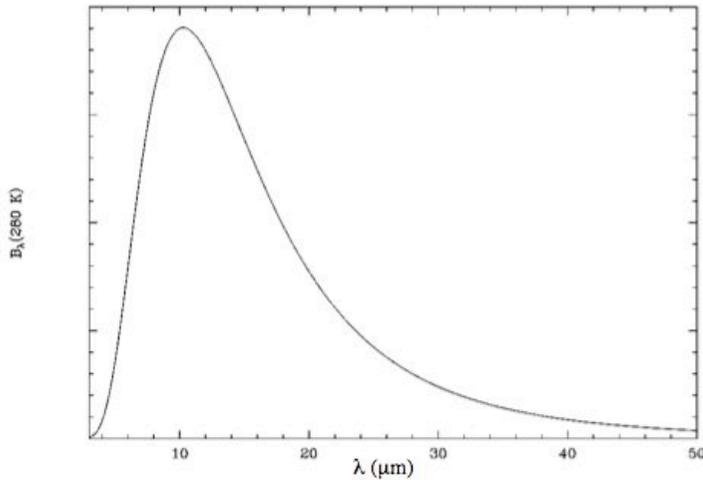
⇒ Flux solaire disponible par unité de surface terrestre = $C/4$

Flux solaire absorbé par la Terre = $(C/4) (1 - A_{atm}) (1 - A_T)$

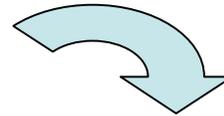
Flux rayonné par la Terre = σT_T^4

Flux infrarouge absorbé par la Terre = $\sigma T_T^4 Q_{abs} / 2$

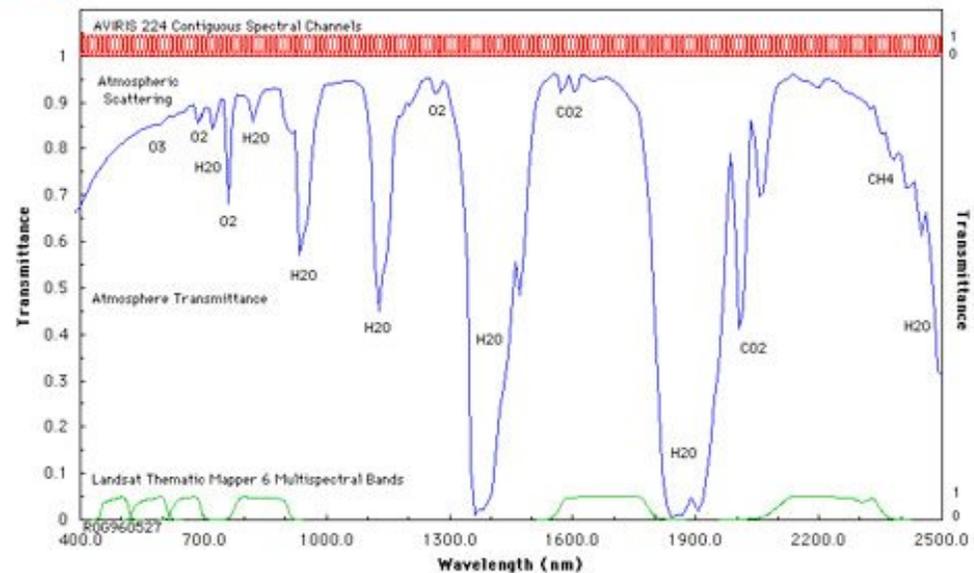
BILAN:
$$\frac{C}{4} (1 - A_{atm})(1 - A_T) + \frac{1}{2} \sigma T_T^4 Q_{abs} = \sigma T_T^4$$



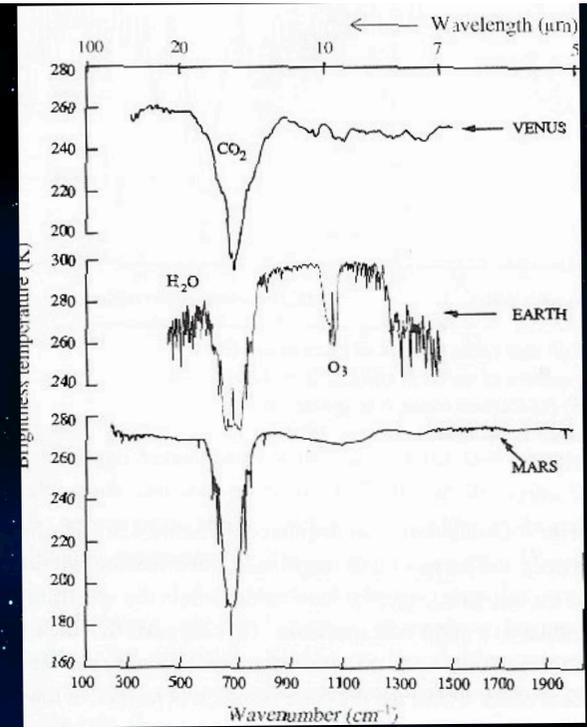
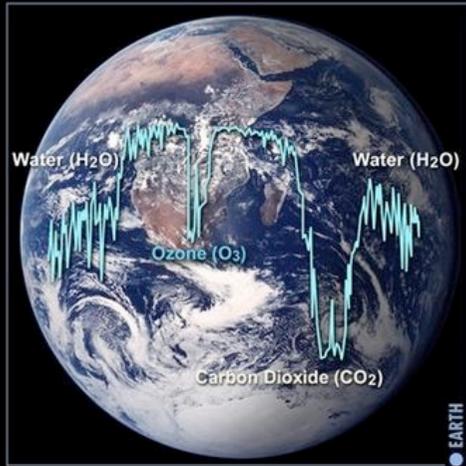
Rayonnement de corps noir à la température de la Terre



AVIRIS Measurements in the Solar Reflected Spectrum .

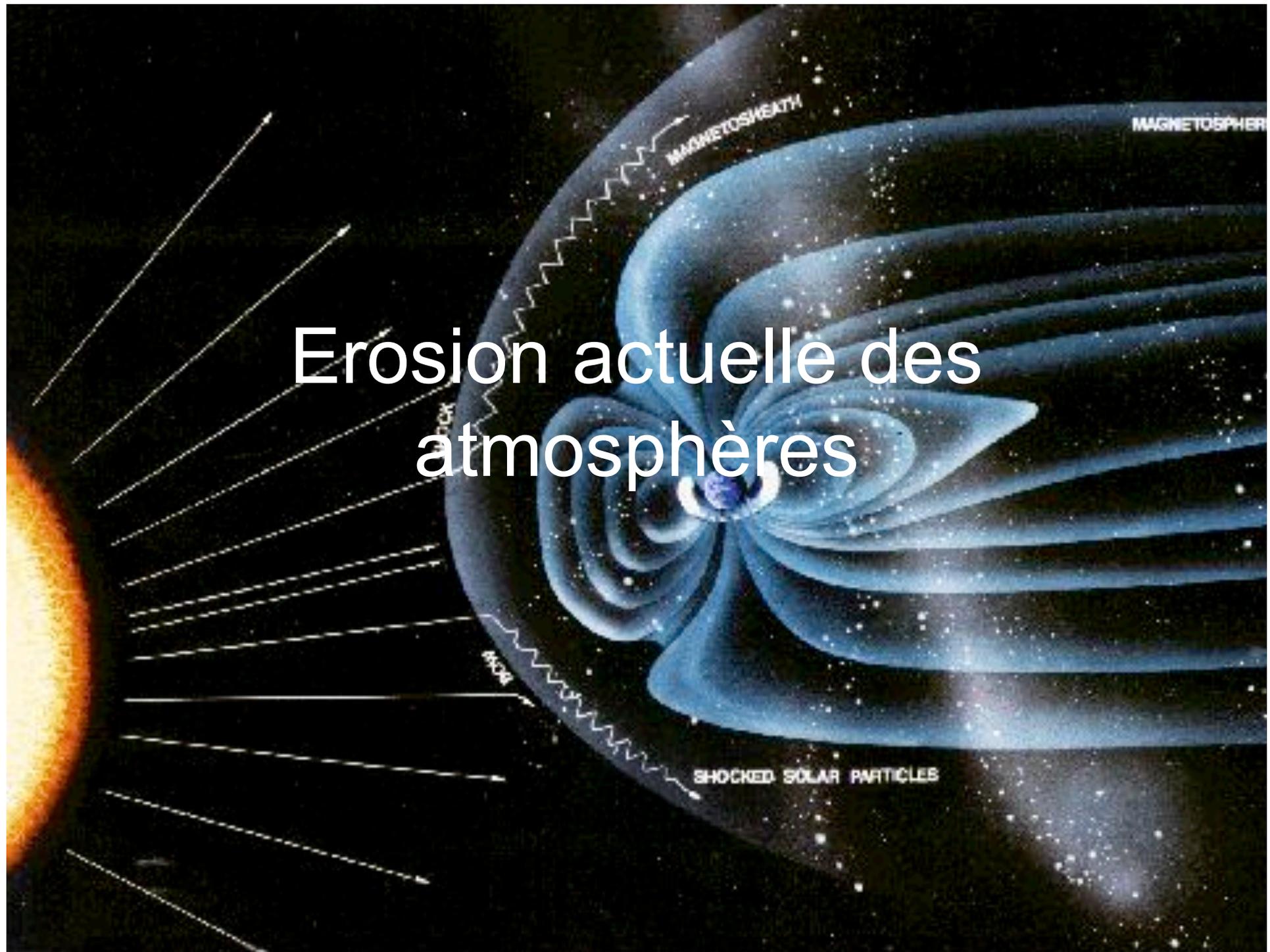


- Calcul de Q_{abs} compliqué
- Dépend des constituants atmosphériques (gaz à effet de serre)
- Dépend de l'émission de surface

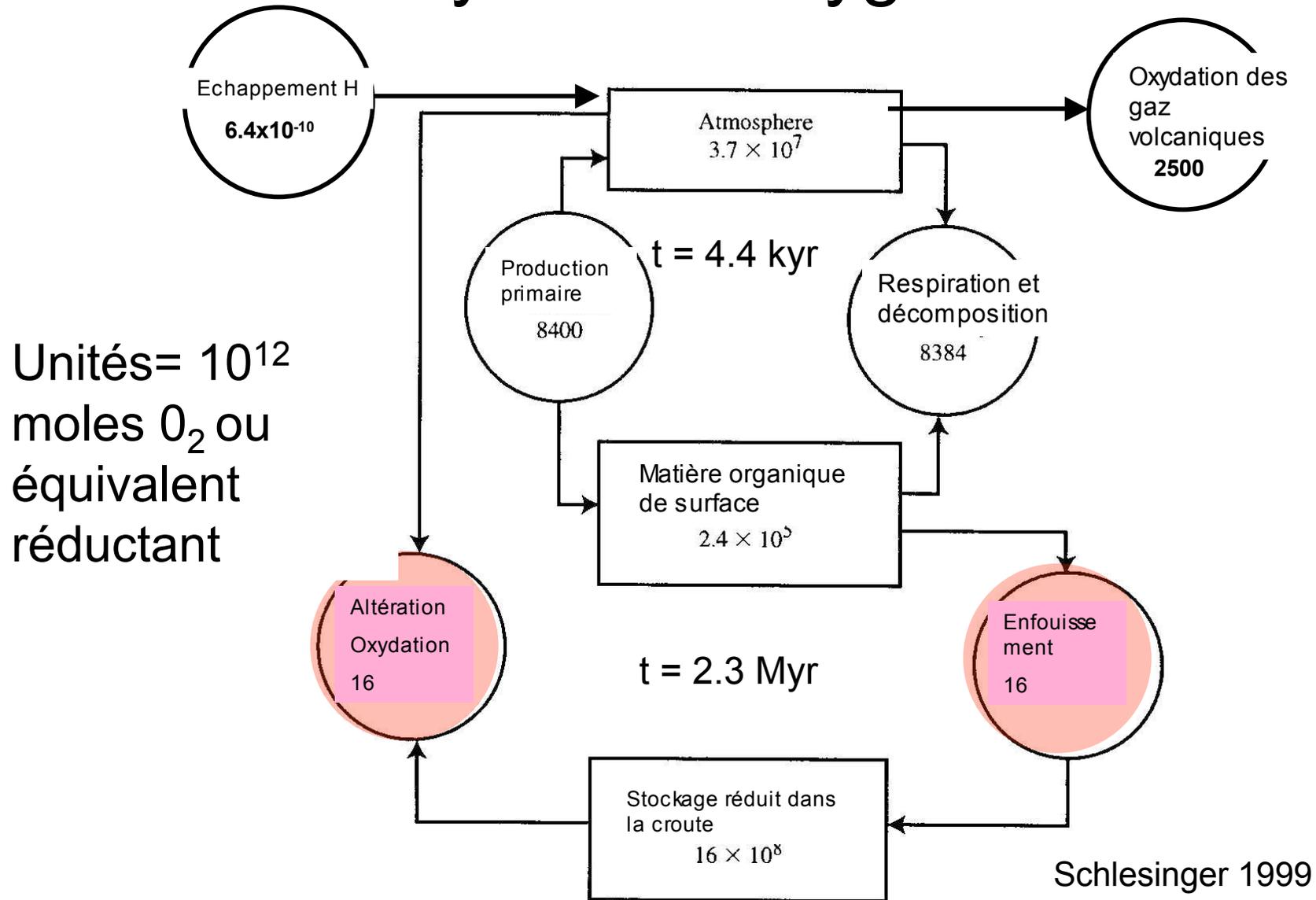


- D'ici quelques années, des spectres d'atmosphère de planètes d'autres systèmes stellaires...

Erosion actuelle des atmosphères



Cycle de l'oxygène



Que se passe-t-il dans la thermosphère?

- Températures très hautes $T > 600 \text{ K}$
- Grande agitation des molécules

	H	D	He	N	O
Masse (gr)	1	2	4	14	16
Vitesse moy (m/s)	4468,557	3159,7	2234,3	1194,3	1117,1

Vitesse de libération

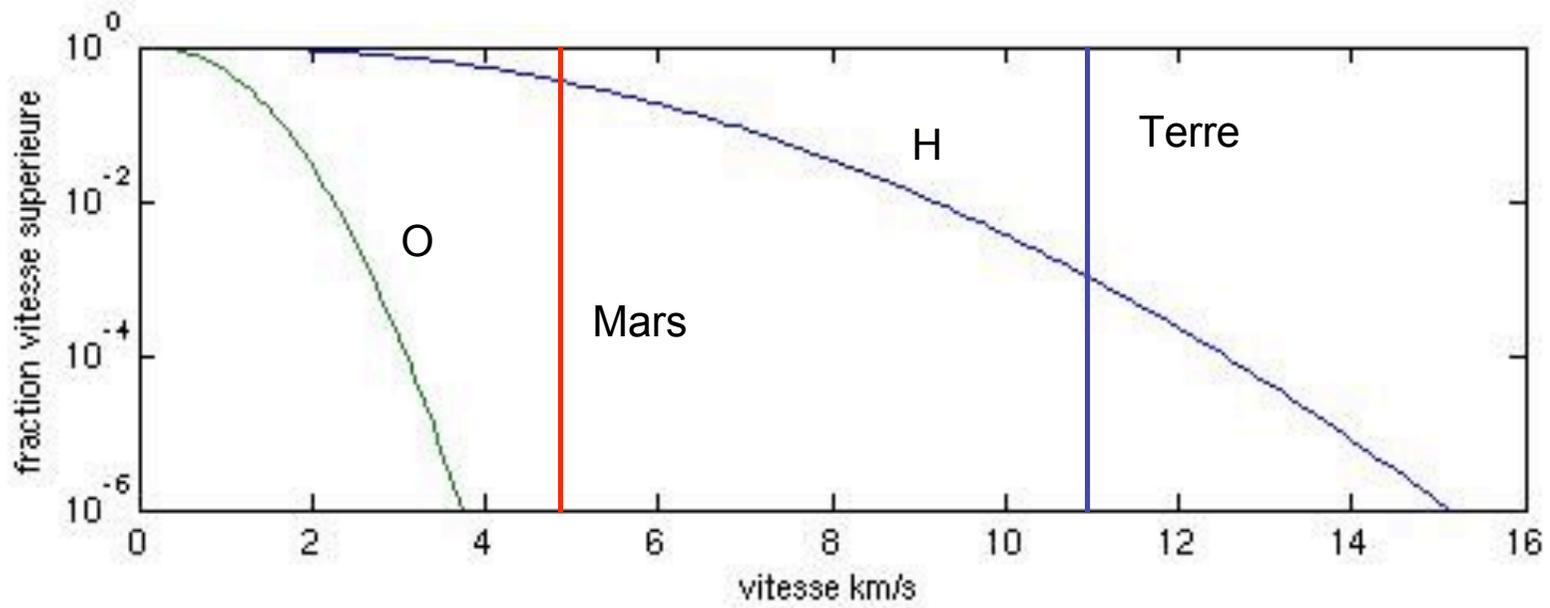
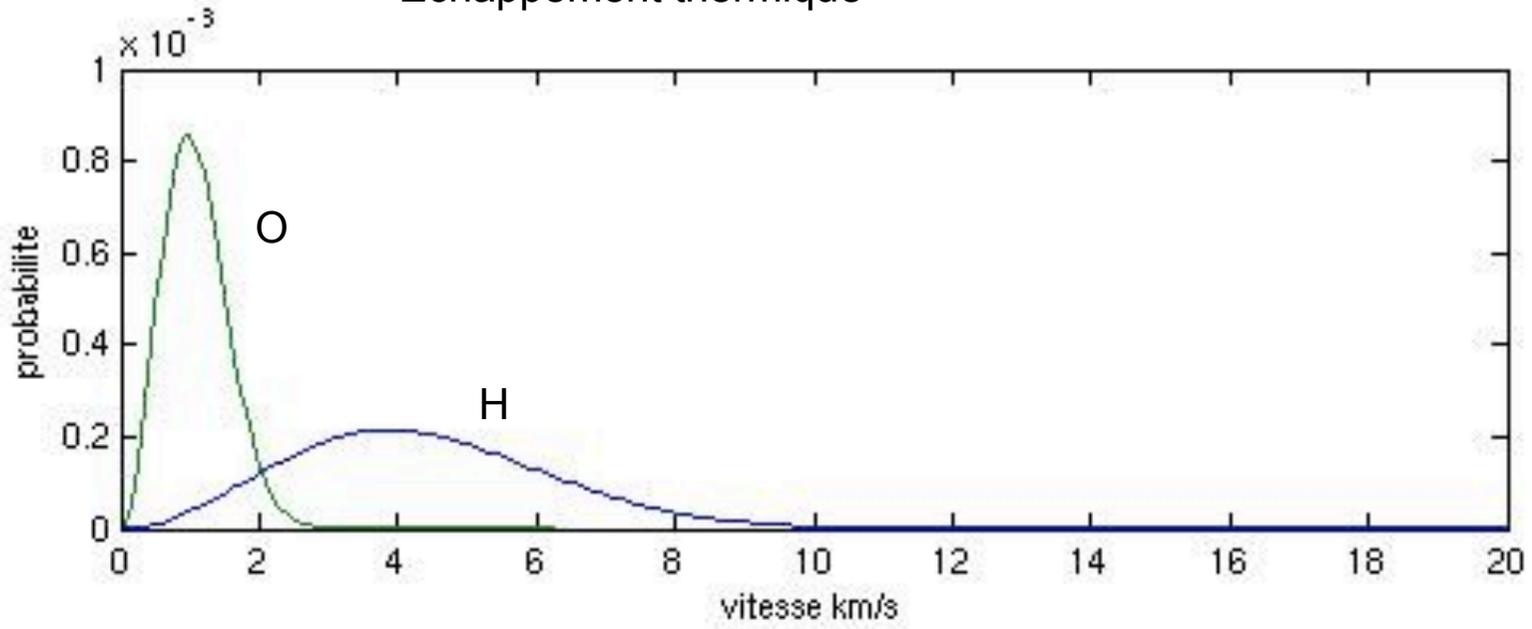
Grandeur liée à l'interaction gravitationnelle :

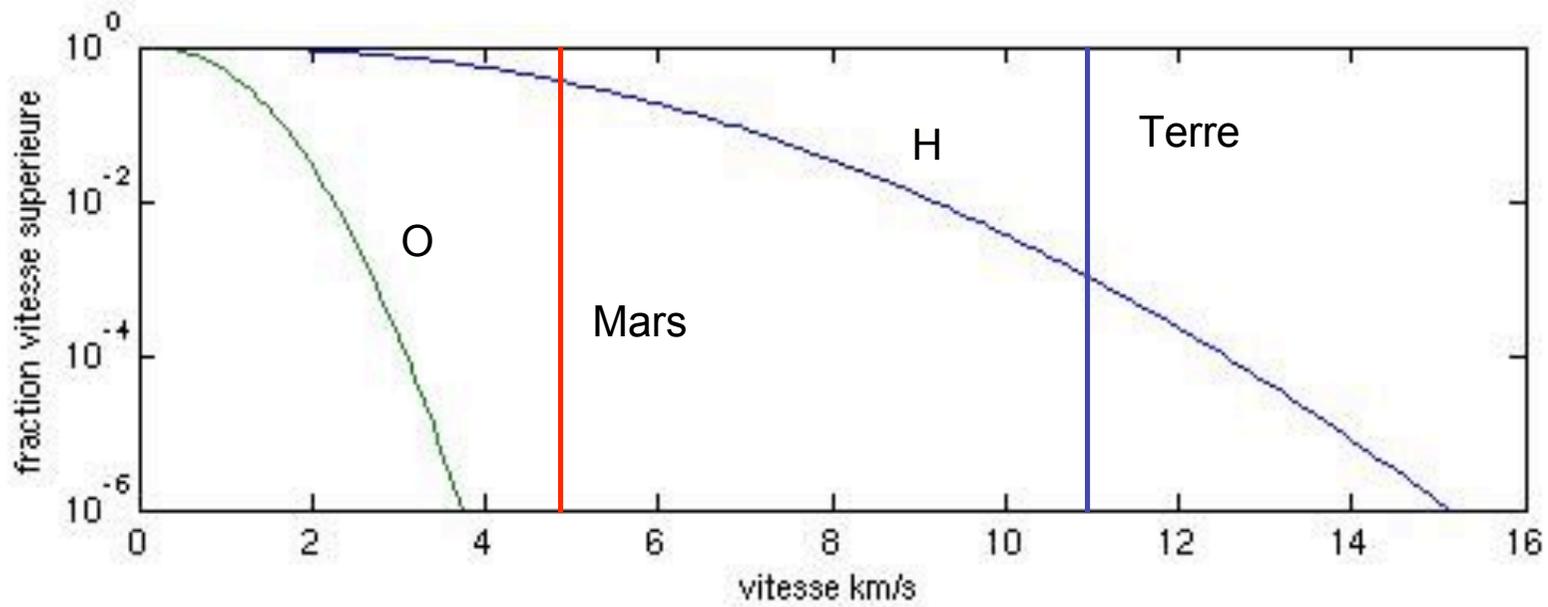
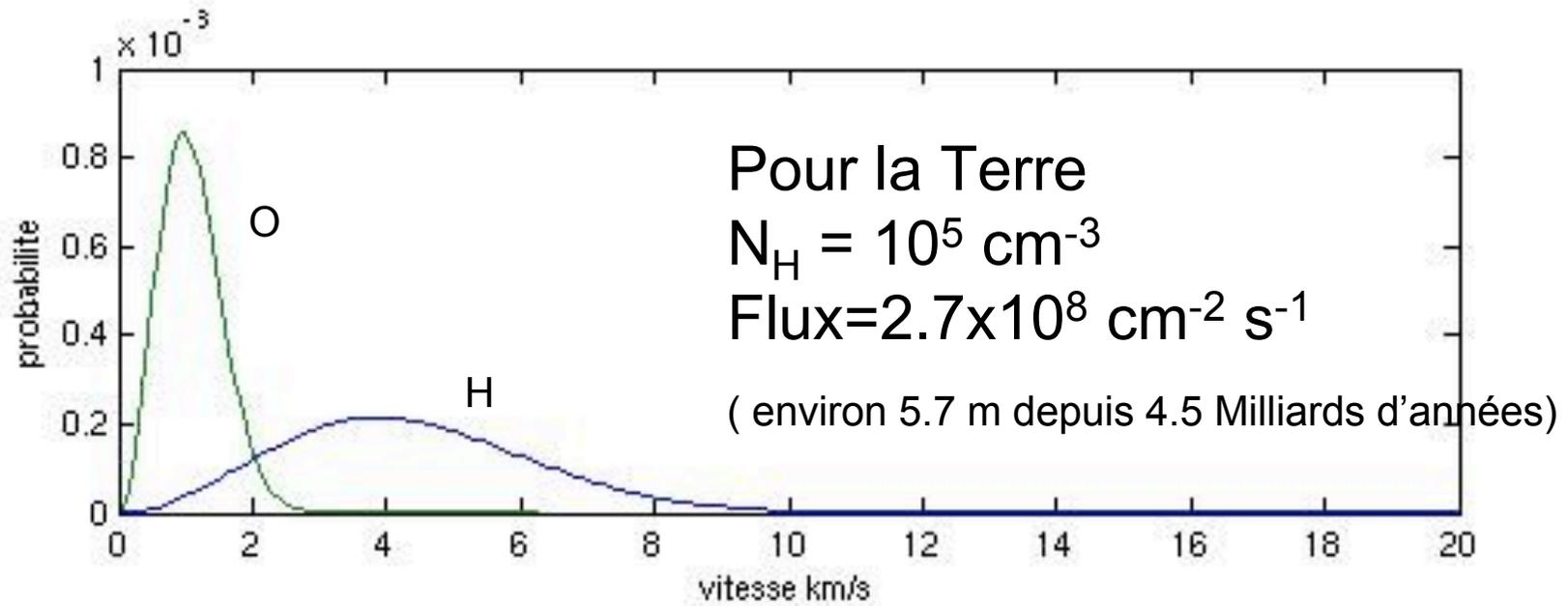
vitesse minimale (à la surface de la planète) que doit avoir un corps massif pour échapper au champ de gravité de la planète (i.e. énergie mécanique > 0)

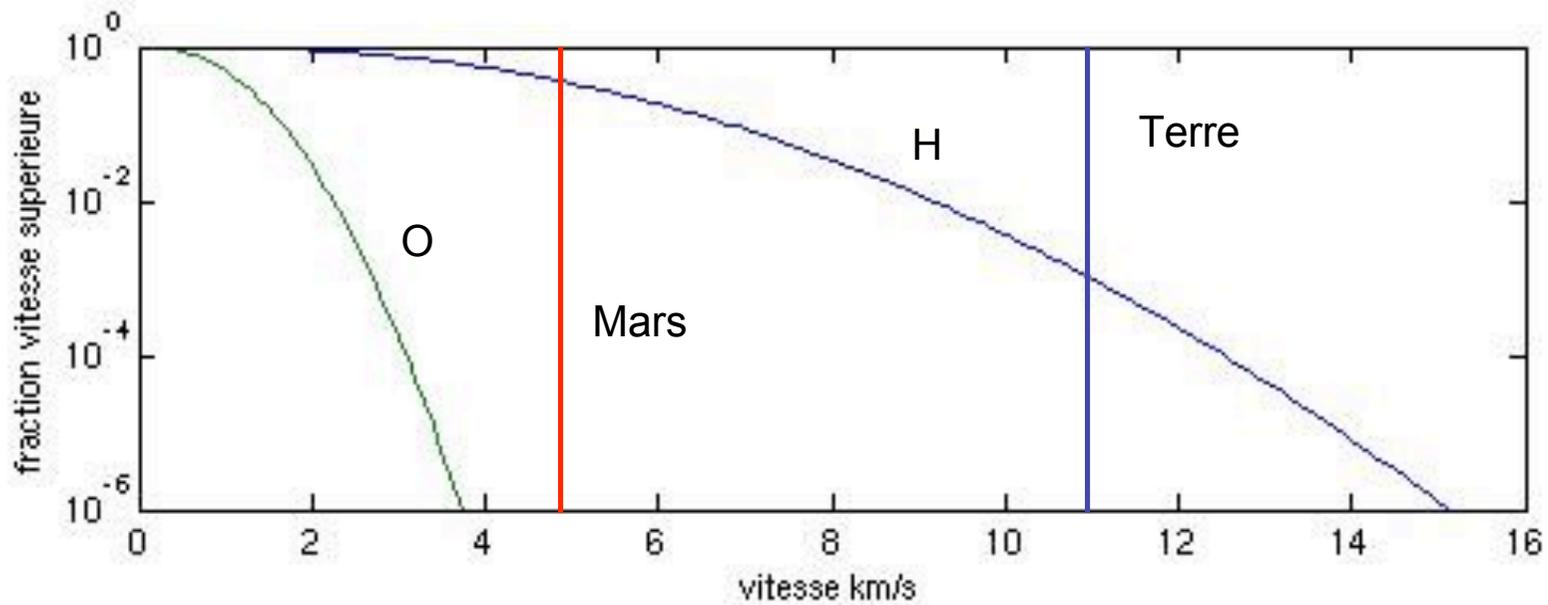
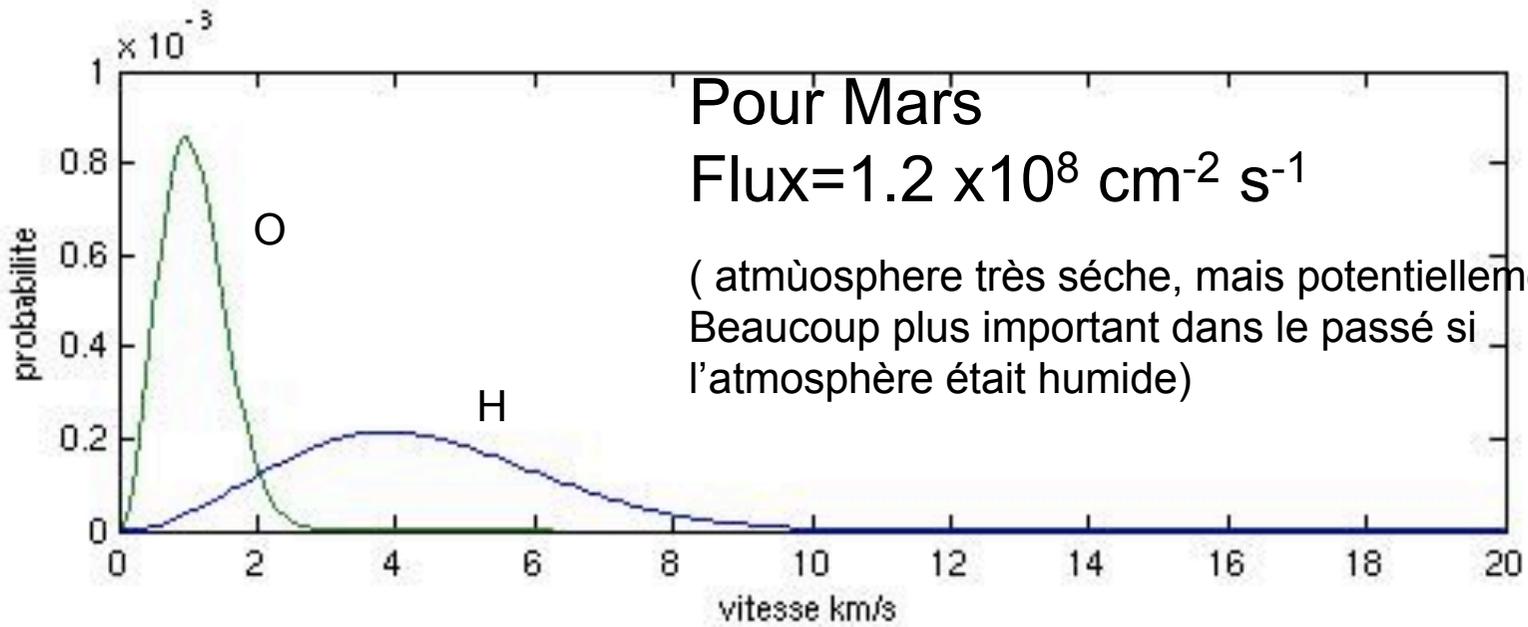
$$V_{lib} = \sqrt{2GM_p / R_p}$$

	Mercure	Lune	Mars	venus	Terre	Jupiter
rayon	2440	1738	3389	6051	6371	71492
gravité	3,701	1,71	3,71	8,87	9,81	23,1
libération	4249,81	2438	5014,6	10361	11180	57471,1267

Echappement thermique

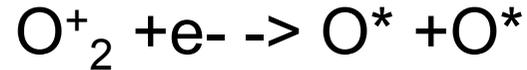




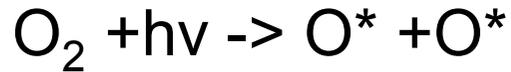


Autres mécanismes (1/2)

- Dissociations et recombinaisons



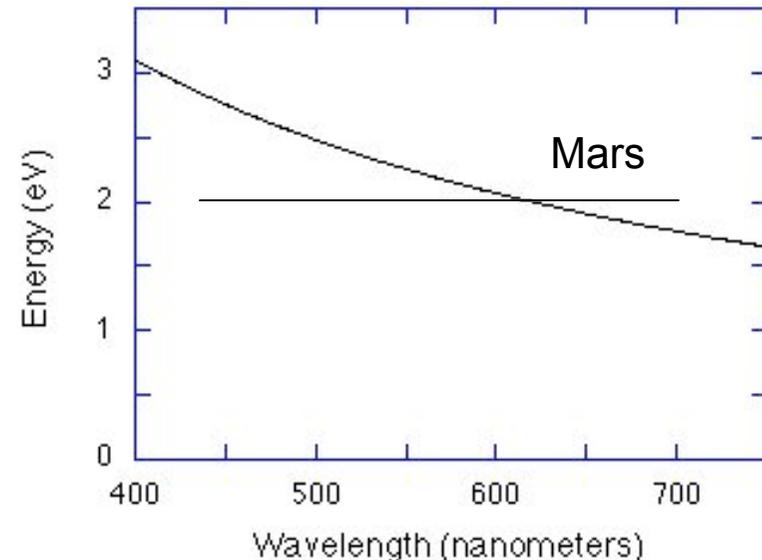
(atomes excités de 3.5 eV à 5.3 eV)



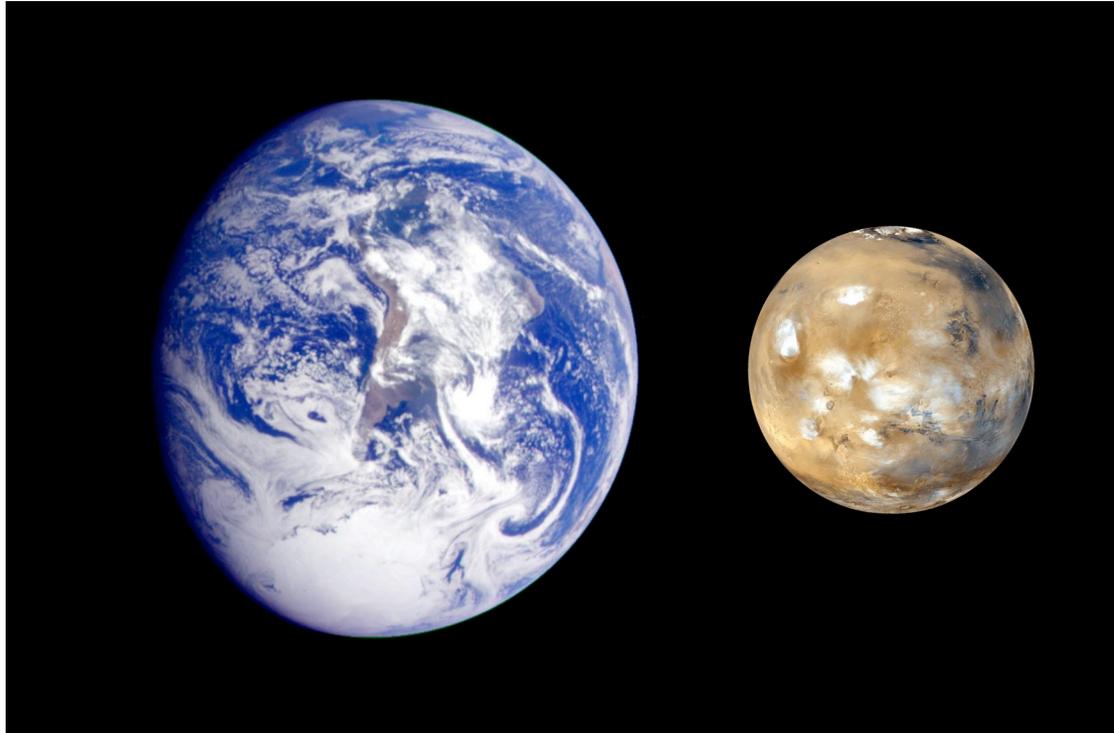
- Les atomes ont une énergie plus grande que l'énergie de libération pour Mars et plus faible pour la Terre
- Perte importante d'Oxygène sur Mars

($6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

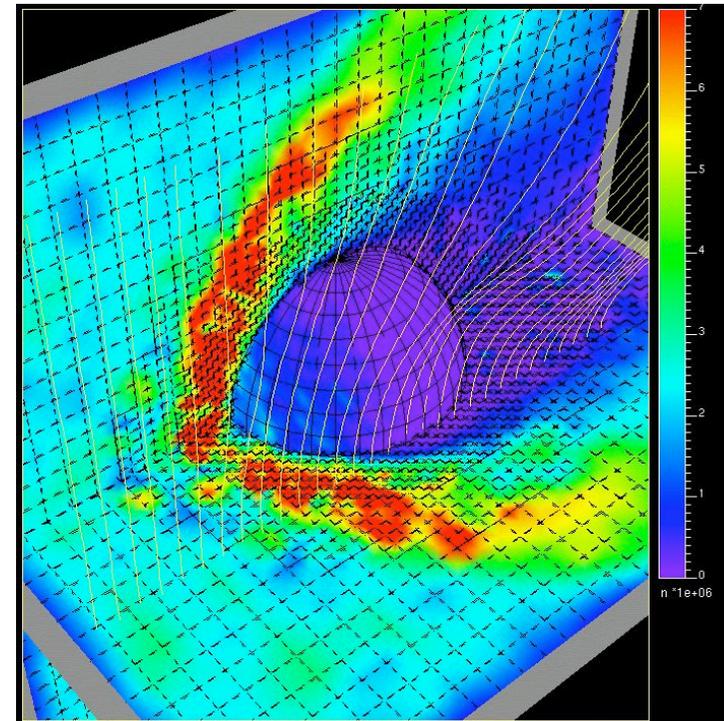
Energie de libération pour l'oxygène sur Mars ~2 eV
Energie de libération pour l'oxygène sur terre ~10 eV



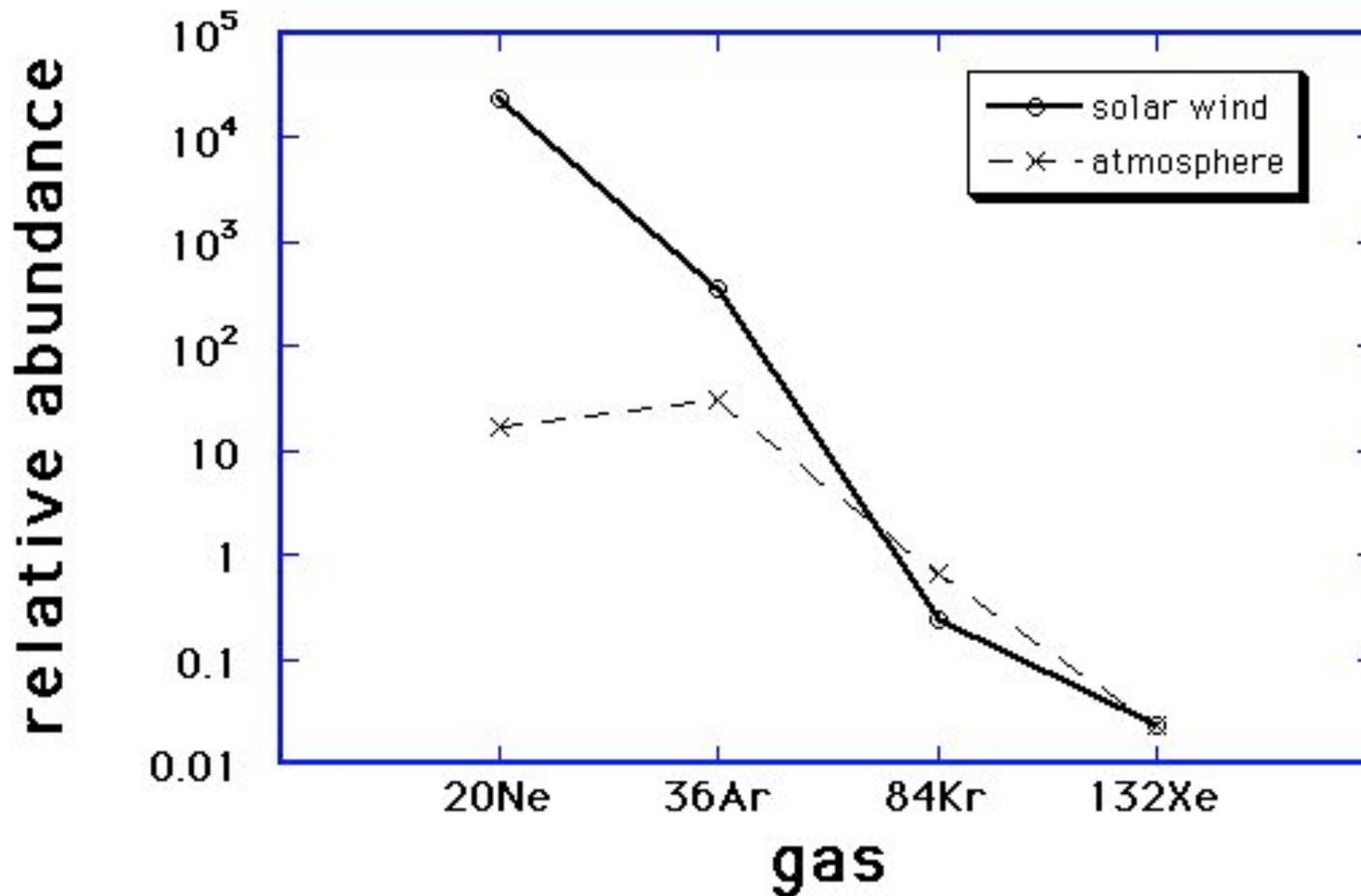
Autres mécanismes (2/2)



Pas de protection du champ magnétique:
Le vent solaire entraîne une partie de l'atmosphère



Où est passée l'atmosphère primitive de la Terre



L'atmosphère d'une planète
peut donc progressivement
disparaître...